T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GNSS ZAMAN SERİLERİNDE GÜRÜLTÜ ANALİZİ ÜZERİNE BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Osman SERDAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Ekim, 2023

GNSS ZAMAN SERİLERİNDE GÜRÜLTÜ ANALİZİ ÜZERİNE BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Osman SERDAR tarafından hazırlanan tez çalışması 23.10.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr.Cüneyt AYDIN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Burak AKPINAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mahmut Oğuz SELBESOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Cüneyt AYDIN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "GNSS ZAMAN SERİLERİNDE GÜRÜLTÜ ANALİZİ ÜZERİNE BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Osman SERDAR

ÖNSÖZ

Bu çalışmada hem GNSS zaman serilerini analiz etmek hem de sürece etkiyen gürültü türlerini tespit edip modellemek amacıyla GEOTSATOOL adlı bir yazılım paketi geliştirilmiştir. Yazılım, teknik hesaplama için uygun mimarisi nedeniyle MATLAB GUIDE ortamında geliştirilmiştir. Yazılımın grafik kullanıcı arayüzü (GUI) olması kullanıcılara kolaylık sağlamaktadır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, benimle bilgi ve deneyimlerini paylaşan, tez çalışmamın planlanması, araştırılması ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Cüneyt Aydın'a en içten dileklerimle teşekkür ederim. Kendisi, çalışmama yönlendirmeleri ve bilgilendirmeleriyle, beni bilimsel temeller ışığında şekillendirdi ve bu süreçte bana büyük bir destek oldu.

Ayrıca, geliştirmiş olduğum yazılımın testi için kullandığım GNSS zaman serileri verilerinin sunucusu Nevada jeodezik laboratuvarına, TUSAGA-Aktif hızları sunucusu Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) kurumlarına ve çalışmada kullanmış olduğumu MATLAB yazılımının akademik lisansını sağlayan YTÜ Rektörlüğüne teşekkürü bir borç bilirim.

Osman SERDAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **iv**
İÇİNDEKİLER **v**
SİMGE LİSTESİ **vii**
KISALTMA LİSTESİ **viii**
ŞEKİL LİSTESİ **ix**
TABLO LİSTESİ **xi**
ÖZET **xii**
ABSTRACT **xiv**
1 GİRİŞ **16**
1.1 Literatür Özeti....16
1.2 Tezin Amacı....18
1.3 Hipotez....19
1.4 Tez İçeriği....19
2 GNSS ZAMAN SERİLERİ, ANALİZİ ve GÜRÜLTÜ TÜRLERİ **21**
2.1 Zaman Serileri: Tanım....21
2.2 Zaman Serileri Analizi....22
2.3 GNSS Zaman Serileri....22
2.4 GNSS Zaman Serileri Analizi....24
2.4.1 Fonksiyonel Model (Harmonik Regresyon Modeli)....24
2.4.2 GNSS Zaman Serilerinde Gürültü Türleri....25
2.4.3 Stokastik Model....30
2.4.4 LS-VCE Yöntemi....31
3 GNSS ZAMAN SERİLERİ ANALİZ YAZILIMI: GEOTSATOOL **33**
3.1 Veri Yükleme....34
3.2 Fonksiyonel Model (Hız Kestirimi)....36
3.2.1 Harmonik Regresyon....39
3.2.2 Düzeltmeler....40
3.2.3 Kaba Hata Analizi....41
3.3 Stokastik Model (Gürültü Analizi)....42
3.4 Sonuçların Raporlanması....44
4 UYGULAMA **47**

4.1 Çalışma Alanı ve Verilerin Tanıtılması 47
4.2 GEOTSATOOL Gürültü Analizi 53
4.3 Renkli Gürültünün Hız Belirsizliğine Etkisi 59
5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER **63**
KAYNAKÇA **65**

SİMGE LİSTESİ

f	Frekans
κ	Spektral index
$\mathbf{y}$	Ölçü vektörü
$\boldsymbol{x}$	Bilinmeyenler vektörü
$\boldsymbol{A}$	Katsayılar matrisi
v	Hız vektörü
o	Verideki offset
p	Periyodik etki sayısı
AC_m , AS_m	Mevsimsel salınım genlikleri
$\mathbf{C}_{yy}$	Kovaryans matrisi
$\mathbf{Q}_{yy}$	Ağırlık katsayıları matrisi
σ_0^2	Birim ağırlıklı ölçünün varyansı
σ_{WN}^2	Beyaz gürültü varyans bileşeni
σ_{FN}^2	Kırpışma gürültüsü varyans bileşeni
σ_{RWN}^2	Rastgele yürüyüş gürültü varyans bileşeni
$\mathbf{Q}_{\mathrm{FN}}$	Kırpışma gürültüsü ağırlık katsayıları matrisi
$\mathbf{Q}_{\mathrm{RWN}}$	Rastgele yürüyüş gürültüsü ağırlık katsayıları matrisi
$\mathbf{T}_i$	Dönüşüm matrisi
$\tilde{\mathbf{C}}_{yy}$	Yaklaşık kovaryans matrisi
$\mathbf{P}^{\perp}$	Projeksiyon matrisi
$\hat{\mathbf{e}}$	Hata vektörü
$\boldsymbol{\Phi}$	Enlem
$\boldsymbol{\lambda}$	Boylam

KISALTMA LİSTESİ

EUREF	European Reference Frame
FN	Flicker Noise
GGM	Gaussian Geostatistical Model
GNSS	Global Navigation Satellite System
GUI	Graphical User Interface
LS-VCE	Least Square Variance Component Estimation
MAD	Median Absolute Deviation
MLE	Maximum Likelihood Estimation
NN-LSVCE	Non Negative Least Square Variance Component Estimation
PSD	Power Spectral Density
RWN	Random Walk Noise
TUSAGA	Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı
WN	White Noise

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Zaman serileri üzerine etkiyen faktörler.....22
Şekil 2.4 Beyaz, kırpışma ve renkli gürültü zaman serileri örnekleri.....26
Şekil 2.5 Zaman serisindeki gürültü türleri sınıflandırılması.....27
Şekil 2.6 Örnek log-log PSD grafiği.....28
Şekil 2.7 Kırpışma gürültüsü örnek log-log PSD grafiği.....28
Şekil 2.8 Rastgele yürüyüş gürültüsü örnek log-log PSD grafiği.....29
Şekil 3.1 GEOTSATOOL temel bileşen ve fonksiyonları akış diagramı.....34
.....35
Şekil 3.2 GEOTSATOOL veri formatı.....35
Şekil 3.3 Nevada jeodezi laboratuarından elde edilen tnv3 uzantılı veri formatı örnek dosya.....35
Şekil 3.4 XYZ txt uzantılı veri format örnek dosya.....35
.....36
Şekil 3.5 XYZ xlsx uzantılı veri format örnek dosya.....36
Şekil 3.8 Seçili istasyona ilişkin ofset bilgileri paneli (veride bulunan ofset zamanları ve ayrıntıları).....38
Şekil 3.9 Seçili istasyon bileşenlerinin (N, E, U) zaman serileri grafiklerini içeren grafik paneli.....38
Şekil 3.10 "Fit" fonksiyonu ile elde edilmiş regresyon grafiği örneği.....39
Şekil 3.11 "Export Matrix" fonksiyonu fonksiyonel modele ilişkin matris ve vektör sonuçları örneği.....40
Şekil 3.12 "Residuals" fonksiyonu ile çizdirilen düzeltmelerin bir örnek grafiği.....41
Şekil 3.13 "Show Outliers" fonksiyonu ile çizdirilen örnek bir kaba hatalı ölçü grafiği42
Şekil 3.15 "Otokorelasyon" fonksiyonu ile elde edilen düzeltmelere ait örnek bir otokorelasyon grafiği.....44
Şekil 3.16 Gürültü türü seçimi ve rapor fonksiyonu.....44
Şekil 3.17 Hız kestirimi, standart hata sonuçları ve gürültü modeline ilişkin bilgilerin yer aldığı örnek rapor dosyası başlık bölümü (AYD1 istasyonu zaman serisi verilerine ilişkin kullanılan fonksiyonel model, ölçü ve kaba hatalı ölçü sayısı, ofset bilgileri, kestirim sonuçları ve standart sapmaları).....45
Şekil 3.18 Her bir bileşen için (a-doğu, b-kuzey, c yükseklik) fonksiyonel modelde geçen bilinmeyenler ve standart hataları örnek rapor dosyası.....46
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan GNSS istasyonları konumları.....47

Şekil 4.2 Nevada GNSS istasyonları haritası 49
Şekil 4.3 TUSAGA GNSS istasyonları haritası 49
Şekil 4.4 GEOTSATOOL hız kestirimi sonucu Doğu- Kuzey bileşenleri hız vektörleri 50
Şekil 4.5 Hız kestirimlerinin grafiksel dağılımı 52
Şekil 4.6 ADAN noktasına ilişkin düzeltmeler grafiği 53
Şekil 4.7 ADAN noktası log-log PSD grafiği P 54
Şekil 4.8 ADAN noktası otokorelasyon grafiği 54
Şekil 4.9 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri gürültü modeli dağılımı 57
Şekil 4.10 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri spektal indeks değerleri dağılımı 58
Şekil 4.11 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri hızları için PL standart hatalarının WN standart hatalarına oranı (PL/WN) 61
Şekil 4.12 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri için WN ve PL standart hataları dağılımı 62

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Çalışmada kullanılan GNSS istasyonları konumları ve veri aralıkları 48

Tablo 4.2 Hız kestirim sonuçlarının Nevada ve TUSAGA sonuçları ile karşılaştırılması 51

Tablo 4.3 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri standart hataları, spektral indeks değerleri 56

Tablo 4.4 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri WN ve PL standart hataları karşılaştırması 60

ÖZET

GNSS ZAMAN SERİLERİNDE GÜRÜLTÜ ANALİZİ ÜZERİNE BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Osman SERDAR

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Zaman serilerinin analizi tektonik çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. GNSS zaman serileri ise günümüzde sabit ya da kampanya tipi ölçüler ile izlenen tektonik bölgelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Tüm zaman serilerinde olduğu gibi, GNSS zaman serilerinde de beklenmeyen hatalar yer alır. Beklenmeyen bu hatalar, yalnız beyaz gürültü (white noise-WN) düzeyinde değil, renkli, özellikle, kırpışma gürültüsü (flicker noise-FN) ve rasgele yürüyüş gürültüsü (random walk noise-RWN) türlerindedir. Bu gürültüler GNSS zaman serilerinde zamansal korelasyonlar meydana getirir. Zamansal korelasyonların göz önüne alınmaması zaman serilerinden elde edilen hızların standart hatalarının eksik kestirimine neden olur. Bir başka deyişle, renkli gürültü özellikleri tanımlanmamışbir zaman serilerinin analizinde elde edilecek hızların standart hataları düşük çıkar. Bu nedenle, hızlar üzerinde doğru bir istatistik analiz yapabilmek için renkli gürültülerin göz önüne alınması gerekir.

Bu çalışmada GNSS zaman serilerinin analizi için MATLAB ortamında grafik kullanıcı arayüzüne (GUI) sahip bir yazılım tasarlanmıştır. Bu yazılımda kaba hatalı ölçüler robust

yöntemlerle ayıklanmakta, farklı gürültü kombinasyonları için (WN; WN+FN, WN+FN+RWN) gürültü genlikleri en küçük kareler varyans bileşenleri kestirimi (LS-VCE) ile elde edilerek en uygun ağırlıklandırma yapılıp hız kestirimlerinin en uygun standart hataları elde edilmektedir. Çalışmada, söz konusu yazılımın teorik arka planı anlatılmakta, özellikleri, akış şeması, tasarımı verilmekte, Nevada Geodetic Laboratory GPS Networks üzerinden birtakım örnekler irdelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: GNSS zaman serisi, gürültü analizi, stokastik model hataları, renkli gürültü, MATLAB.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR NOISE ANALYSIS IN GNSS TIME SERIES

Osman SERDAR

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr.Cüneyt AYDIN

The analysis of time series has an important place in tectonic studies. Today, GNSS time series are frequently used in tectonic regions monitored by continuous or campaign-type surveys. As with all time series, GNSS time series are subject to unexpected errors. These unexpected errors are not only white noise (WN) but also colored noise, especially flicker noise (FN) and random walk noise (RWN). These noise types introduce temporal correlations in GNSS time series. Ignoring the temporal correlations leads to underestimation of the standard errors of the velocities derived from the time series. In other words, the standard errors of the velocities obtained from the analysis of time series of which colored noise features are not well defined are underestimated. Therefore, to perform an accurate statistical analysis on velocities, colored noise should be taken into account.

In this study, a software with a graphical user interface (GUI) was designed in MATLAB environment for the analysis of GNSS time series. In this software, outlier measurements are eliminated by robust methods, noise amplitudes for different noise combinations (WN; WN+FN, WN+FN+RWN) are obtained by least squares variance component estimation (LS-VCE) and the most appropriate standard errors of the velocity estimates

are obtained by making the most appropriate weighting. The theoretical background of the software is explained, its features, flowchart and design are presented, and some examples from the Nevada Geodetic Laboratory GNSS Networks are discussed.

Keywords: GNSS time series, noise analysis, stochastic model error, colored noise, MATLAB.

1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

19. yy. başından beri yerkabuğu deformasyonlarını izlemek için jeodezik ölçümler kullanılmaktadır. Jeodezik gözlemlerden elde edilen zaman serilerine doğrusal bir fonksiyonunun uydurulması ve deformasyon miktarlarının ya da oranlarının bu yolla belirlenmesi alışılageldik bir uygulamadır. Bu oranlar (örneğin, jeodezik nokta hızları) geleneksel olarak her bir koordinat bileşeninin doğrusal regresyonu ile belirlenir. Regresyon modelinin tahmininde ölçüm hatalarının normal dağılımlı olduğu ve istatistiksel olarak birbiriyle ilişkili olmadığı (beyaz gürültü olduğu) yaklaşımı pratikte yaygındır. Ancak, yarım yüzyıldan fazla bir zamandır birçok çalışma, jeodezik zaman serilerinin zamansal ya da mekânsal korelasyonlar (dolayısıyla, renkli gürültü) içerebileceğini belirtmektedir.

Bir zaman serisindeki gürültü, frekansa bağlı bir güç yasasına sahip olan güç spesifikasyonu ile karakterize edilebilir [1], [2], [3]. Bu, gürültünün zamansal frekansının (f) bir fonksiyonu olan aşağıdaki güç spektrumuna sahip olduğu anlamına gelir [4]:

$$PSD(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\kappa} \tag{1.1}$$

Burada P_0 ve f_0 normalleştirici sabitler, κ spektral indekstir. Tipik olarak spektral indeks κ, -3 ile 1 aralığındadır. Gürültü bileşenine, spectral indeksi -1 < κ < 1 aralığında ise durağan süreç (kesirli beyaz gürültü hareketi), -3 < κ < -1 aralığında ise durağan olmayan süreç (kesirli Brownian hareketi) adı verilir. Bilinen gürültü türleri beyaz gürültü (WN) (κ=0), kırpışma gürültüsü (FN) (κ= −1) ve rastgele yürüyüş gürültüsüdür (RWN) (κ=−2). Beyaz gürültü dışında diğer gürültü türlerini ifade ederken "renkli gürültü" terimi kullanılmaktadır. Bu tür bir gürültü, zaman serilerine uydurulacak doğrusal fonksiyonun eğilimini, yani nokta hızının belirsizliğini olması gerekenden 5 ile 11 kat daha düşük kestirimini önlemek için dikkate alınmalıdır [5]. Bu gürültü davranışı, 414 GNSS

istasyonu koordinat zaman serisini inceleyen Williams vd. (2004)'üngösterdiği gibi çoğu GNSS gözleminde mevcuttur. Bir güç yasası (power law-PL) gürültüsü artı beyaz gürültü (WN) modelinin (PL+WN) bir kombinasyonunun, zaman serilerinin çoğunda var olan gürültü için yeterli bir temsil sağladığı sonucuna varmışlardır. Amiri-Simkooei vd. (2007), Langbein (2008), King ve Williams (2009) ve Santa maria-Gómez vd. (2011) daha uzun zaman serileri ile de benzer sonuçlara varmışlardır. Ray vd. (2019), Kuzey-Doğu Hindistan'da bulunan 22 GPS istasyonuna ilişkin 10 yıllık verileri kullanarak yaptıkları çalışmada GPS istasyonlarının %74'ünün WN+PL (beyaz artı güç yasası gürültüsü) ya da WN+FN (beyaz artı kırpışma gürültüsü) modeli ile daha iyi tanımlanabileceğini ortaya koymuşlardır. Nistor, vd. (2021) yaklaşık 200 EUREF Kalıcı Ağı (EPN) istasyonu zaman serileri gürültü özelliklerini araştırdıkları çalışmada, birçok istasyonun FN ve bazı istasyonların ise RWN gürültü modeli sergilediklerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Aydin vd. (2021), renkli gürültünün göz önüne alınmadan analiz yapılması durumunda hız belirsizliklerinin 2 ila 16 kat daha küçük kestirilebileceğini, dolayısıyla, hızlara ilişkin yapılan istatistiki testlerin belli oranlarda yanlış olabileceğini göstermektedirler.

Günümüzde, yirmi yılı aşkın bir zaman genişliğine sahip zaman serileri yardımıyla spektral gücü daha da düşük frekanslarda inceleyebilmek mümkün olmaktadır. Bu, WN + PL modelinin güç spektrumunda hala küçük frekansta baskın olup olmadığını veya güç spektral yoğunluğu $P(f)$'nin bir düzleşme başlangıcını tespit edip edemeyeceğimize imkan tanır. Langbein'in (2004) genelleştirilmiş Gauss–Markov (GGM) gürültü modeli böylesi bir etkiyi modellemek için uygundur. Aslında, güç spektrumunun bu şekilde eğimini kaybederek düzleşmesi, gürültünün artık tahmini hızın daha düşük belirsizlikleriyle sonuçlanan uzun hafızalı bir süreç olmadığını ima eder.

He vd. (2019), yaptıkları çalışmada, gözlemlenen en düşük frekanslar olarak gürültünün en iyi tanımını bulmak ve bunu stokastik bir model kullanarak daha da düşük frekanslarda tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Son zamanlarda, Langbein ve Svarc (2019), ABD'nin batısındaki 740 GNSS istasyonuna ait zaman serilerini analiz etmiştir. Çalışmada, en az 9.75 yıllık veriye sahip GNSS zaman serilerinin önemli miktarda zamansal korelasyonlara sahip olduğu gösterilmektedir. Stokastik gürültü modelleri en iyi beyaz, kırpışma, rastgele yürüyüş ve filtrelenmiş gürültünün bir kombinasyonu ile tanımlanır.

Renkli gürültü türlerinin kestirim işleminde dikkate alınması için, uygulamada Hector (Bos vd. 2013), CATS (Williams 2008) gibi temel yazılımlar kullanılır. Bu yazılımlarda maksimum olabilirlik yöntemine göre bir kestirim yapılarak, ilgili gürültü türlerinin genlikleri belirlenir. Bu genlikler yardımıyla ağırlıklandırma yapılarak uygun bir stokastik model oluşturulur. Benzer yaklaşım, zaman serilerinin fonksiyonel modeli (harmonik regresyon modeli) ve ölçülerin bilinmeyen varyans bileşenli kovaryans matrisi ile oluşturulan "varyans bileşenleri bilinmeyen Gauss-Markoff modeli" biçiminde yazılarak da ele alınabilir. Bu bilinmeyen varyans bileşenleri (ilgili gürültü modelinin gürültü genlikleri), IAUE, BIQUE, Helmert yaklaşımı ya da en küçük kareler varyans bileşen kestirimi (LS-VCE) gibi varyans-bileşen kestirim modelleri uygulanarak da belirlenebilir. LS-VCE yöntemi (Amiri-Simkooei 2007; Teunissen and Amiri-Simkooei 2008), en genel varyans bileşen kestirim yöntemi olarak, zaman serilerindeki gürültü modelinin belirlenmesi için en sık kullanılan yöntemdir. Ancak, gürültü türlerinin belirlenmesinde belli problemlerle karşılaşılır. Gürültü modeli ne kadar karmaşık ise söz konusu yöntemler çözüm vermede o kadar sıkıntı yaşar ve varyans bileşenleri eksi işaretli olarak kestirilir. Ayrıca, zaman serisinin uzunluğu, incelenen aralıkta toplam ölçü sayısının düşük olması, bazı gürültü genliklerinin diğerlerine baskın olması gibi sebeplerle de varyans bileşen kestirim yöntemleri çözümsüzlüğe gider (Aydin vd. 2021). Varyans-bileşen kestirim çalışmalarında böyle bir durumla karşılaşılması durumunda genellikle model değiştirilir. Ancak negatif kestirim problemini çözebilmek için non-negative (NN) olarak adlandırılan yöntemler de kullanılagelmektedir. Amiri-Simkooei (2016), bu amaçla, NN-LSVCE adı verilen bir yöntem önermiştir. Bu yöntem her zaman bir çözüm verir ve varyans bileşenlerinin her zaman pozitif işaretli olmasını sağlar.

1.2 Tezin Amacı

Literatür özeti bölümünde incelen çalışmaların birçoğunda vurgulandığı üzere, gerçekçi hız belirsizliklerinin belirlenmesi için GNSS zaman serilerinde gürültü analizi önem arz etmektedir. Standart olarak kullanılan yazılımlar ise hem işletim sistemi uyumsuzlukları hem de karmaşıklığı nedeniyle kullanıcı dostu özelliğinde değildir; yazılımlara dışarıdan müdahale etmek ise pek mümkün değildir. Bu amaçla, bu çalışmada (i) GNSS zaman serilerinde harmonik regresyon analizi yapabilen, ve (ii) sürece etkiyen gürültü türlerinin

NN-LSVCE ile modellenerek gerçekçi bir stokastik model yardımıyla hız belirsizliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesini sağlayan kullanıcı ara yüzlü bir MATLAB yazılımı geliştirmek hedeflenmiştir. Böylece hem kullanımı kolay hem de dışarıdan müdahale edilerek istenen analizlerin gerçekleştirilebileceği bir yazılım oluşturulmuştur.

1.3 Hipotez

GNSS zaman serileri analizinin doğru bir şekilde yapılarak analizin sonuçlandırılması, gerçekçi bir varyans-kovaryans matrisinin oluşturulmasına bağlıdır. Bu değerlendirme ışığında, çalışmanın dayanağını oluşturan aşağıdaki hipotezler ele alınmıştır:

(a) GNSS zaman serileri, tüm zaman serilerinde olduğu gibi hem beyaz hem de renkli gürültü barındırmaktadır.
(b) Renkli gürültü genlikleri jeodezide bilinen varyans bileşen kestirim yöntemi olan LSVCE ile uygun biçimde belirlenir.
(c) Stokastik süreçte renkli gürültü varlığının göz ardı edilmesi hız belirsizliklerinin olması gerekenden daha eksik kestirimine neden olur.

1.4 Tez İçeriği

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde literatür özeti, çalışmanın amacı hipotez ve ana hatları açıklanmaktadır.

Bölüm 2'de kısaca zaman serileri, zaman serileri analizi, GNSS zaman serileri, GNSS zaman serileri analizi, GNSS zaman serileri fonksiyonel modeli, GNSS zaman serilerine etkiyen gürültü türleri ve stokastik model tanımlanmaktadır.

Bölüm 3'te geliştirilen MATLAB-GEOTSATOOL yazılım paketi tanıtılmaktadır. Veri içe aktarma, fonksiyonel model, stokastik model ve yazılımın analiz bileşenleri ve fonksiyonları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Bölüm 4'te geliştirilen yazılım ile Türkiye'deki birtakım GNSS zaman serisi analizi örnekleri üzerinde çalışılmakta; elde edilen sonuçlar Nevada jeodezik laboratuarı sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Bu bölümde, ayrıca, renkli gürültünün stokastik sürece etkisi, elde edilen hız belirsizlikleri üzerinden ele alınmaktadır.

Sonuç ve öneriler bölümünde ise, elde edilen yazılım ve elde edilen bulgular tartışılmakta ve çalışma sonuçlandırılmaktadır.

2

GNSS ZAMAN SERİLERİ, ANALİZİ ve GÜRÜLTÜ TÜRLERİ

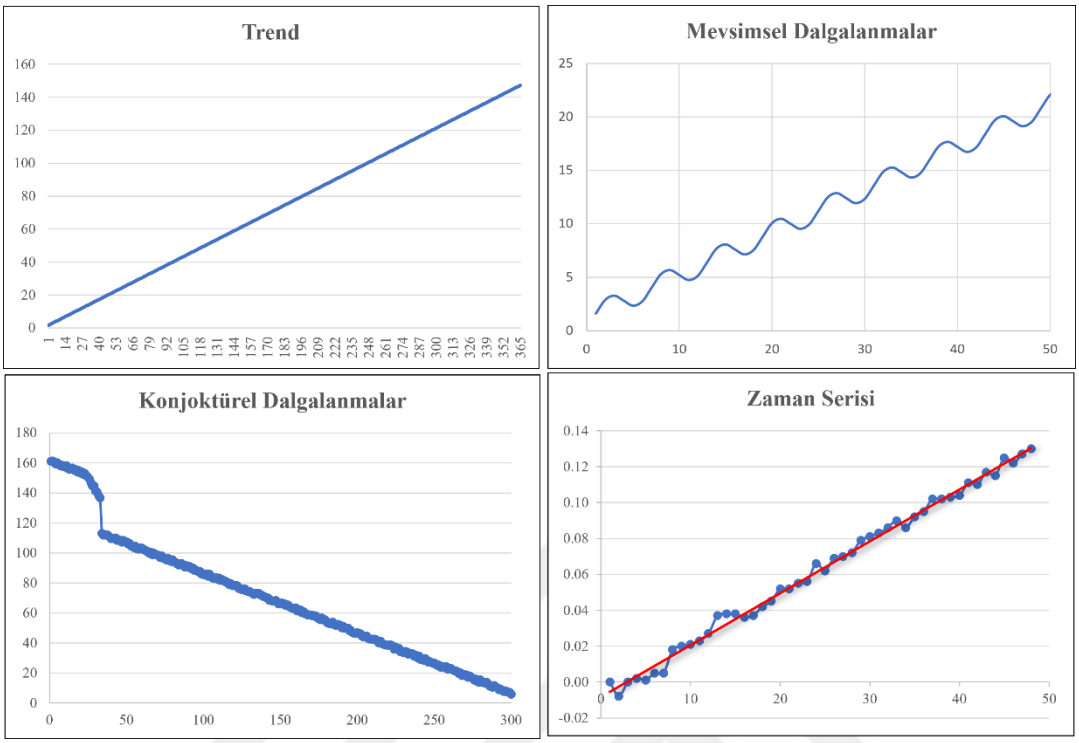
2.1 Zaman Serileri: Tanım

Herhangi bir olayın periyodik aralıklarla gözlenmesinden elde edilen verisinin zamana göre sıralanmasıyla elde edilen ölçü kümesine zaman serileri adı verilir. Verinin zamana bağlı bir fonksiyonu olan zaman serilerinin yorumlanmasına zaman serileri analizi denilmektedir. Zaman serileri analizi birçok bilim dalında kullanılmakta ve bu bilim dallarının gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Bu bölümde GNSS zaman serileri ve analizi, bu zaman serilerine etkiyen stokastik süreçlerden söz edilmektedir.

İlke olarak, zaman serileri analizinde iki olay araştırılır: 1) Geçmiş zamanlara ilişkin gözlemlerden elde edilen zaman serileri analizi ile, ileriye dönük kestirim, 2) Seri üzerinde değişikliğe yol açan herhangi bir etki. Söz konusu etki, anlık ve periyodik bir olay veya belli bir sürece yayılmış olaylar bütünü olabilir. Bu etkiler ve bu etkilerin zaman serileri üzerindeki dereceleri belirlenerek ileriye dönük tedbirler alınmakta veya düzenlemeler yapılabilmektedir [6,7].

Zaman serileri incelendiğinde değerlerin değişimine ve düzensiz hareketler sergilemesine neden olan 4 faktör (bileşen) bulunmaktadır:

a) Trend (eğilim)
b) Mevsimsel - dönemsel etkiler
c) Konjoktürsel dalgalanmalar
d) Düzensiz hareketler – gürültü



Şekil 2.1 Zaman serileri üzerine etkiyen faktörler

2.2 Zaman Serileri Analizi

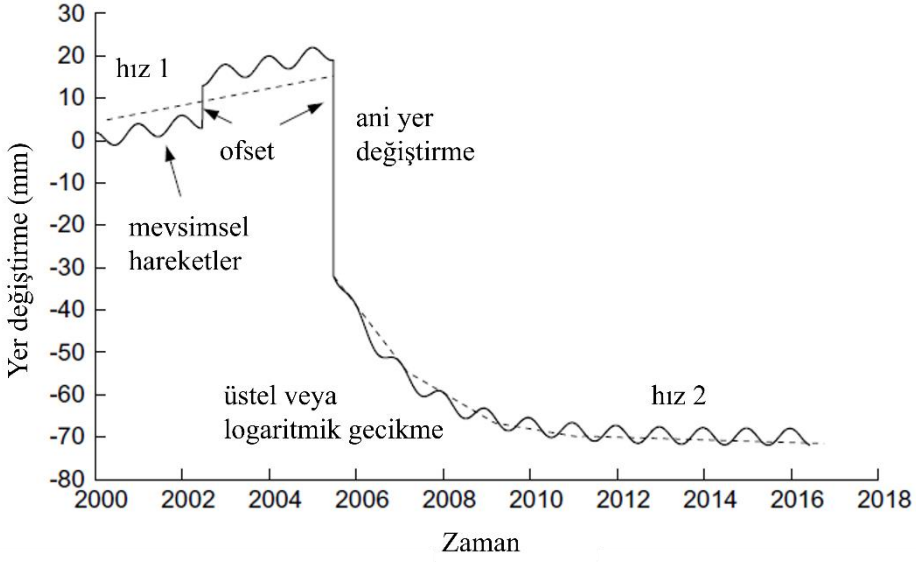
Zaman serisi analizi, bir serinin özelliklerini gözlemlemeyi ve öne çıkan yapısını ortaya çıkarmayı amaçlar. Zaman içinde farklı noktalardaki gözlemler arasındaki ilişkileri inceleyerek zaman alanında ya da periyodik hareketleri göz önünde bulundurarak frekans alanında gerçekleştirilebilir. Her iki yaklaşım da birbirini tamamlar ve zaman serisinin doğasına ilişkin farklı içgörüler sağlar. Zaman serileri analizinde dört temel amaç vardır:

- Trendin belirlenmesi (verilerin dönemlik değişimi ve eğilimi hakkında bilgi edinmek),
- Matematiksel ilişkiyi (regresyon) incelemek,
- Gelecekteki bir değer için tahminde bulunmak,
- Tahmin edilen değerin gerçek değere ne kadar yaklaştığını kontrol etmek [7].

2.3 GNSS Zaman Serileri

19. yy. başından günümüze yerkabuğu deformasyonlarını izlemek için jeodezik ölçümler kullanılmaktadır. Bu jeodezik ölçüm yöntemlerinden en sık tercih edilenleri arasında

GNSS ölçme yöntemi yer almaktadır. GNSS zaman serileri, çeşitli zamanlardaki (epok) bir dizi gözlemden oluşur. Bu gözlemler yer değiştirmenin zamana bağlı fonksiyonunu ifade etmektedir. Gözlemlerden elde edilen zaman serilerine doğrusal bir eğilimin uydurulması ve deformasyon oranlarının elde edilmesi alışılageldik bir yaklaşımdır. Bu oranlar (GNSS nokta hızları), geleneksel olarak her bir koordinat bileşeninin doğrusal regresyonu ile belirlenir. GNSS zaman serileri analizi ile temel amaç, bu regresyon modelini oluşturmak ve oluşturulan modeli test etmektir. Tüm zaman serilerinde olduğu gibi, GNSS zaman serilerinde de değerlerin değişmesine ve düzensiz hareketler sergilemesine neden olan birtakım etkiler bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 GNSS zaman serileri üzerine etkiyen faktörlerin bir temsili çizimi

Regresyon modelinin tahmininde ölçüm hatalarının normal dağılımlı olduğu ve istatistiksel olarak birbiriyle ilişkili olmadığı (yani, beyaz gürültü ile yüklü olduğu) yaklaşımı pratikte yaygındır. Ancak, yarım yüzyıldan fazla bir zamandır birçok çalışma, jeodezik zaman serilerinin zamansal korelasyonlar içerebileceğini, dolayısıyla beyaz gürültü yanında bu korelasyonların neden olduğu renkli gürültü ile yüklü olduklarını belirtmektedir [8]. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu etkilerin belirlenmesi ve modellenmesi ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.4 GNSS Zaman Serileri Analizi

2.4.1 Fonksiyonel Model (Harmonik Regresyon Modeli)

GNSS zaman serileri, çeşitli zamanlardaki (epok) bir dizi gözlemden oluşur. Bir **y** vektöründe tutulan bu gözlemler mükemmel değildir; çeşitli fiziksel etkenlerden dolayı ortaya çıkan gürültü ile yüklüdürler. Bunların çoğu, kısa vadede (multipath ve uydu alıcısı geometrisi, troposferik anomaliler) meydana gelir ve etkileri ölçülere uygulanan çeşitli değerlendirme teknikleri ile giderilebilir. Fiziksel etkilerin bazıları, uzun vadede ortaya çıkar (yani atmosfer, okyanus ve hidrolojik döngülerin yanı sıra tektonik hareket ve depremlere bağlı yükleme etkileri). Bunlar, tektonik hareket, yer hareketleri, sahanın jeomorfolojik özellikleri gibi nedenlerle meydana gelen farklı frekanslara sahip kayma, hız, sinüzoidal sinyallerden oluşur. Jeodezik gözlemler sonucu elde edilen **y** koordinat vektörü, zamana bağımlı bir değişkendir ve doğası gereği bir regresyon modelidir. Zaman serilerindeki sıçramalar ihmal edilirse, t_i (i = 1,2,…,n) zamanındaki koordinat değeri ya da değişimi olan y_i (i = 1,2,…,n) için basit harmonik regresyon modeli aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [9]:

$$y_i - e_i = y_0 + \sum_{k=1}^{o} h_k \mathrm{H}(t_i - E_k) + v t_i + \sum_{m=1}^{p} AC_m \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_m}\right) + \sum_{m=1}^{p} AS_m \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_m}\right) (\, i = 1,2, \dots, n)$$

(2.1)

Burada e_i, i. ölçünün rastgele hatasını; v, hızı; o, verideki ofseti; p, periyodik etki sayısını; AC_m ve AS_m, mevsimsel salınım genliklerini (Bogusz ve Klos, 2016); T_m, mevsimsel salınımın periyodunu; $H(\dots)$ fonksiyonu, E_k zamanındaki adım fonksiyonunu ifade etmektedir:

$$H(\dots) = \begin{cases} 1 & t_i \geq E_k \\ 0 & t_i < E_k \end{cases} \tag{2.2}$$

Eşitlik (2.1)'in ölçü vektörü (**y**), bilinmeyenler vektörü (**x**) ve katsayılar matrisi (**A**) cinsinden ifadesi aşağıdaki gibidir [10]:

$$\mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_n \,]^T_{n\times 1}$$

$$\mathbf{x} = [y_0 \quad g_1 \quad \cdots \quad g_o \quad v \quad AC_1 \quad AS_1 \quad \ldots \quad AC_p \quad AS_p \,]^T_{u\times 1} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_i & a_{ofset,i} & cos(\frac{2\pi t_i}{T_1})\ldots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{n\times u}$$

Böylece, doğrusal Gauss-Markoff kestirim modeli aşağıdaki gibi yazılır:

$$\mathbf{y} - \mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x}\,;\, \mathbf{C}_{yy} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{yy} \tag{2.4}$$

Burada, n, ölçü sayısı; u, bilinmeyen sayısı (u=2+2p+o); **e**, $n\times 1$ boyutlu rastgele hata vektörü; $\mathbf{C}_{yy}$, $n\times n$ boyutlu zaman serisindeki koordinatların kovaryans matrisi; σ_0^2, birim ağırlıklı ölçünün varyansı ve $\mathbf{Q}_{yy}$, $n\times n$ boyutlu koordinatların ağırlık katsayıları matrisidir.

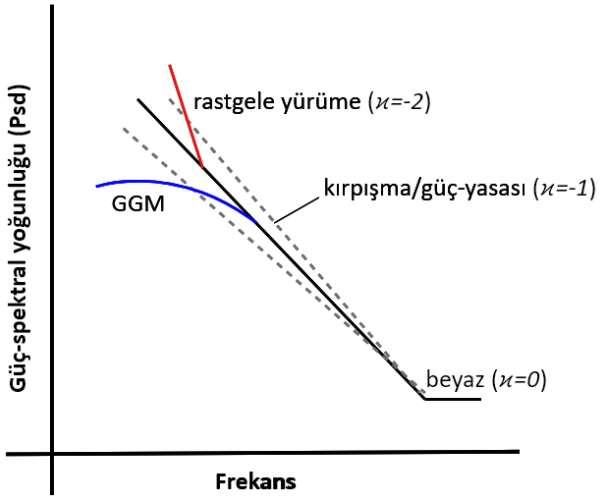
2.4.2 GNSS Zaman Serilerinde Gürültü Türleri

Gürültü, bir sinyalin taşıdığı bilgiyi etkileyen istenmeyen veya kontrol edilemeyen rastgele hataları ifade eder. Bu hatalar sistemin herhangi bir noktasında mevcut olabilir ve güç yasası denklemine göre sinyalin güç spektrumunu etkileyerek zamanla değişebilir:

$$PSD(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\kappa} = L_0 f^{\kappa} \tag{2.5}$$

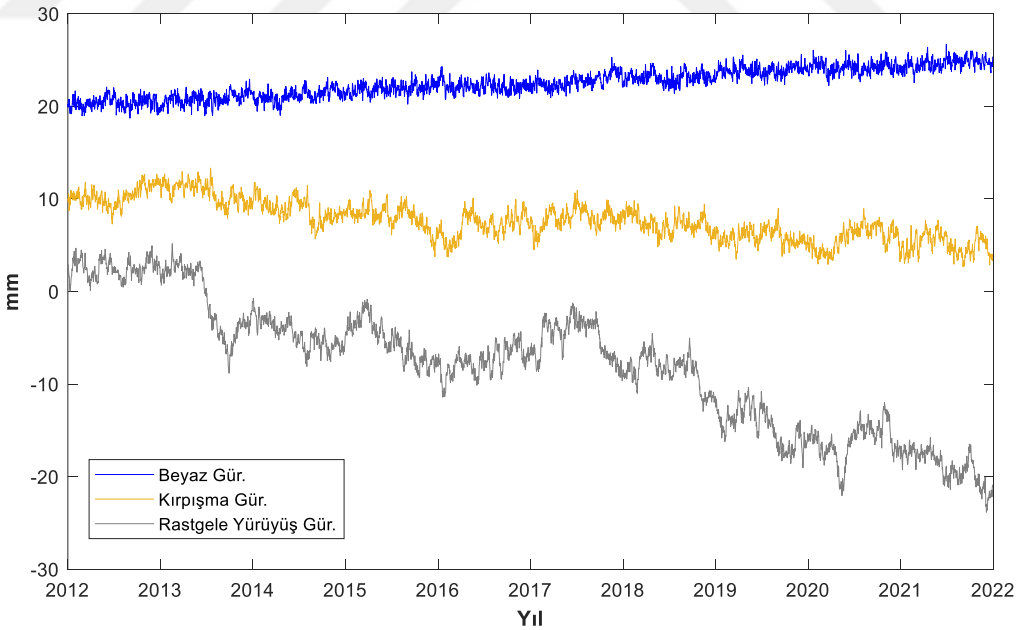
Burada, κ, spektral indeksi gösterir; P_0 ve f_0 normalizasyon sabitleri, L_0 ise yavaş değişen bir fonksiyonu ifade eder [13].

Spektral indeksin değerine bağlı olarak gürültü, beyaz gürültü, kırpışma gürültüsü veya pembe gürültü, rastgele yürüyüş gürültüsü veya kahverengi gürültü, mavi gürültü ve gri gürültü gibi farklı türlerde sınıflandırılabilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Güç yasası gürültüsünün düşük frekanslarda (mavi çizgi) düzleşmesinin veya rastgele yürüyüş gürültüsüne (kırmızı çizgi) bağlı, güç artışının şematik gösterimi

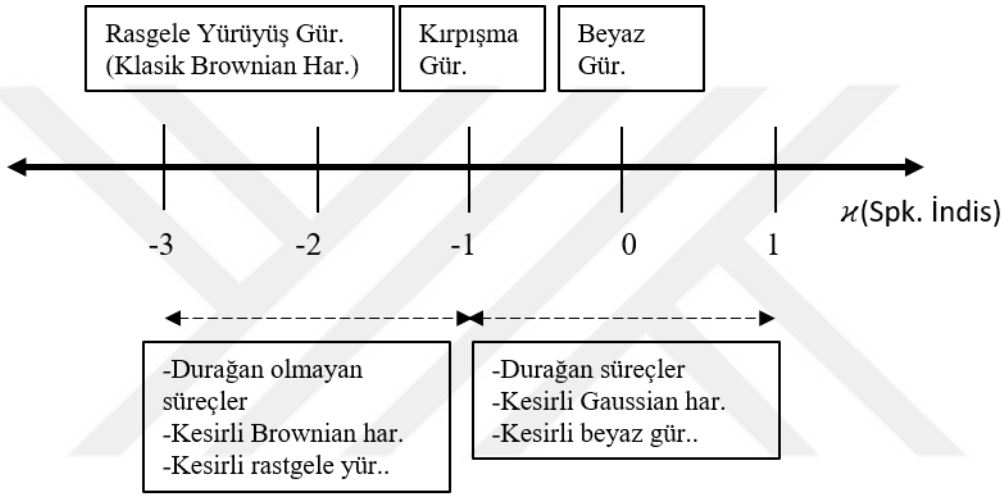
Jeodezik zaman serilerinde, beyaz gürültü ile birlikte kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültüsü sıklıkla ortaya çıkar. Bu gürültü türlerine ilişkin belli bir hız içeren zaman serilerine örnekler Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Beyaz, kırpışma ve renkli gürültü zaman serileri örnekleri

GNSS zaman serilerinde sıklıkla gözlenen kırpışma gürültüsünün güneş aktivitesindeki değişikliklerden, yerin dönüş parametrelerindeki düzensizliklerden ve atom saati hatalarından; rasgele yürüyüş gürültüsünün ise nokta tesisinin yerel jeomorfolojik

özelliklerinden ileri geldiği düşünülmektedir. Genel olarak, zaman serilerindeki gürültü spektral indeks değerleri, [-3, 1] aralığında yer alır. Durağan süreçlerde -1<κ<1 ve durağan olmayan süreçlerde -3<κ<-1 aralığında değişen negatif indeks değerlerine sahiptirler. -3<κ<-1 aralığında olanlar, kesirli Brownian hareketi; -1<κ<1 aralığında olanlar ise kesirli Gaussian gürültü hareketi (kesirli Gauss gürültüsü) olarak adlandırılır. Beyaz gürültü için κ=0, kırpışma gürültüsü için κ=-1 ve rasgele yürüyüş gürültüsü için κ=-2 değerleri kullanılır. Bu gürültü türleri, spektral indekslerine göre Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

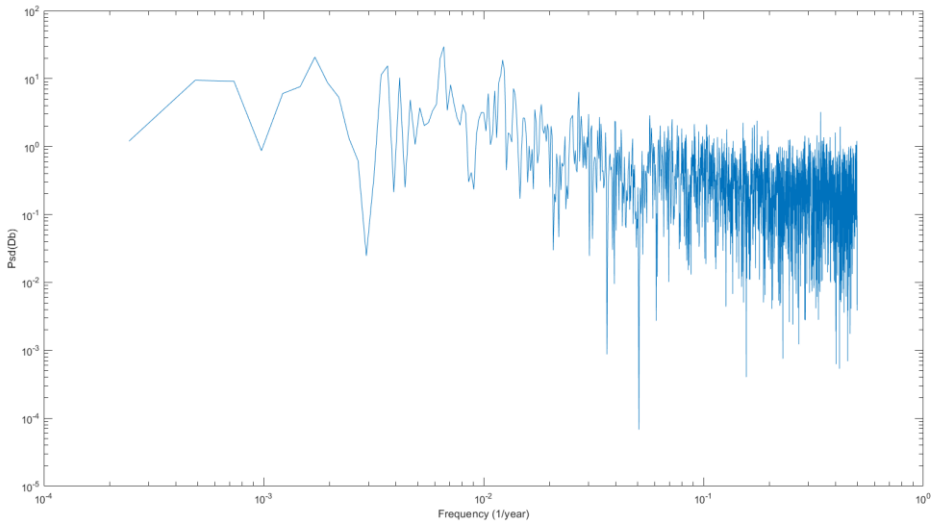


Şekil 2.5 Zaman serisindeki gürültü türleri sınıflandırılması

Eşitlik (2.5)'te geçen L_0 değeri, etkisiz bir fonksiyon olarak ele alındığında, sırasıyla beyaz, kırpışma ve rastgele yürüyüş gürültüsü için, $PSD(f) = f^{(\kappa=0)} = 1$, $PSD(f) = f^{(\kappa=-1)} = 1/f$, $PSD(f) = f^{(\kappa=-2)} = 1/f^2$ PSD değerleri elde edilir. Buradan, yalnız beyaz gürültüye sahip bir sinyalde PSD fonksiyonunun farklı frekanslarda sabit değer alacağı, yalnız kırpışma gürültüsü içeren bir sinyal için PSD fonksiyonunun belirli bir frekans aralığındaki gürültü frekansıyla ters orantılı olarak değişeceği, yalnız rasgele yürüyüş gürültüsü içeren bir sinyal için ise PSD fonksiyonunun belirli bir frekans aralığındaki gürültü frekansının karesiyle ters orantılı olarak değişeceği sonucu ortaya çıkar. Bu sebeple, bir sinyaldeki gürültü özelliklerinin belirlenmesi amacı ile 10log(PSD) fonksiyonu yardımıyla PSD değerleri dB(desibel) birimine dönüştürülür. Eşitlik (2.5)'ten aşağıdaki doğrusal fonksiyon elde edilir:

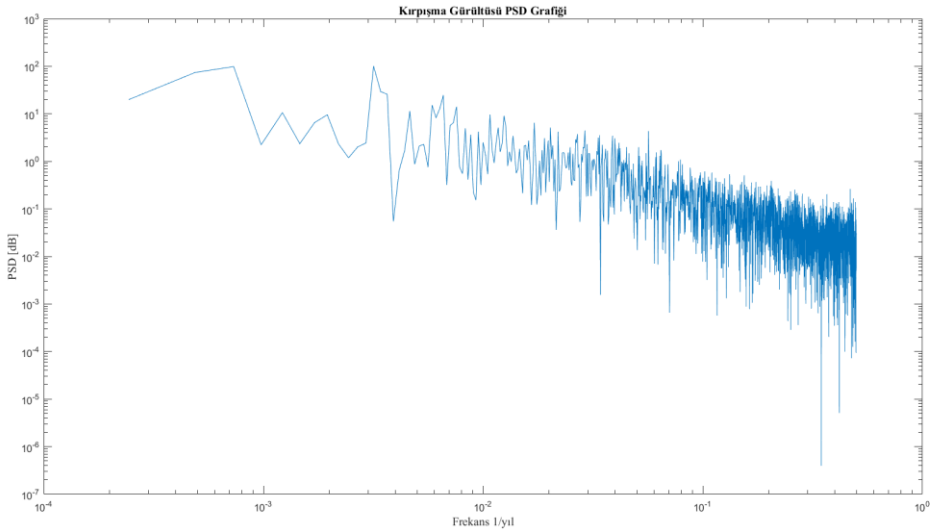
$$10log(PSD) = 10log(L_0) + 10\kappa log(f) \tag{2.6}$$

Bu fonksiyon, doğrusal "$y=ax+b$" fonksiyonu gibi düşünülerek, dB birimindeki PSD değerleri çizdirilip sinyal log-log grafiği elde edilir (bkz., Şekil 2.6). Elde edilen grafikte eğrinin eğimi κ spektral indeksine karşılık gelmektedir.

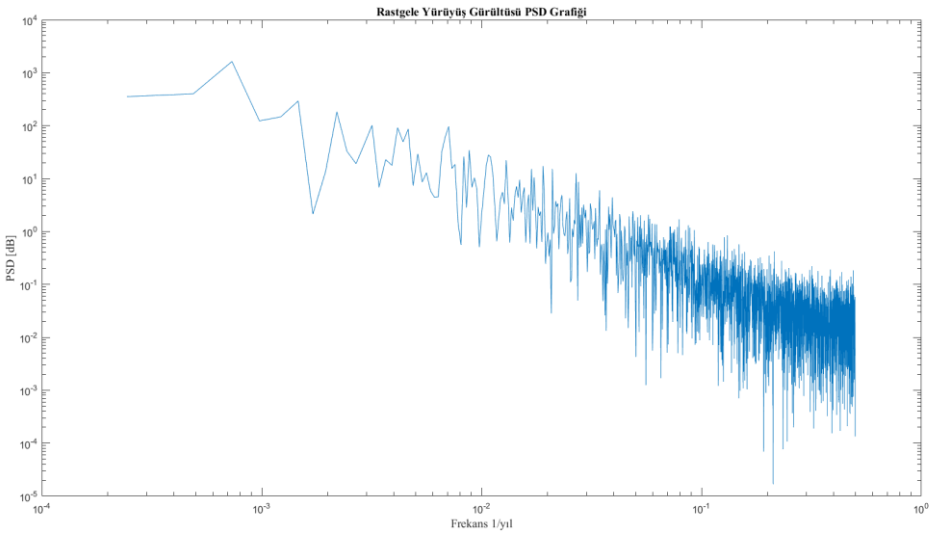


Şekil 2.6 Örnek log-log PSD grafiği

Şekil 2.4'te geçen kırpışma gürültüsü ve rastgele yürüyüş gürültüsü içeren zaman serileri örnekleri için PSD log-log grafikleri Şekil 2.7 ve 2.8'de gösterilmektedir. Beklendiği üzere, Şekil 2.7'de grafik yaklaşık -1 eğimli iken, Şekil 2.8'de -2 civarlarındadır.



Şekil 2.7 Kırpışma gürültüsü örnek log-log PSD grafiği



Şekil 2.8 Rastgele yürüyüş gürültüsü örnek log-log PSD grafiği

Renkli gürültü, beyaz gürültü dışındaki gürültü türüdür ve zaman serilerinin periyodik yapısını etkileyebilir. Bu gürültü türleri, zaman serisinde sinüzoidal dalga gibi ortaya çıkabilir. Örneğin, bir kırpışma gürültüsü mevsimsel bir etki gibi algılanabilir ve yanlış yorumlara neden olur. Bu nedenle, zaman serisinde bilinen etkiler çıkarıldıktan sonra en küçük kareler dengelemesi yoluyla elde edilen düzeltmeler yoluyla doğrudan karar vermemek gerekir. Bunun için, PSD grafikleri çizdirilip, oluşan grafiğin incelenmesi yoluna gidilerek yorum yapılmalıdır. Çünkü, zaman serisinde periyodik dalga gibi algılanabilecek renkli gürültü türleri, PSD log-log grafiklerinde yalnızca eğime neden olur. Ancak, uygulamada bir zaman serisi birden fazla renkli gürültüyü aynı anda içerebilir. Bu durumda, ilgili gürültü türleri birbirine karıştığı için log-log PSD grafikleri üzerinden de yalın bir ön tanı yapmak oldukça zorlaşır [13]. Bu PSD grafikleri, yine de negatif bir eğime sahip olur, ancak yukarıdaki örneklerde olduğu gibi kesin bir yorum yapmak mümkün olmaz. Bu nedenle, belli varsayımlar yapılır. Bu varsayımlar, zaman serisinin belirli periyotlu dalgalara ve/veya belirli spektrumdaki gürültü türlerine sahip olduğu şeklinde bir ön bilgi düzeyindedir. Bu ön bilgi seti, zaman serisinin geri kalan hatalarının spektral analizlerini daha ayrıntılı incelemeye imkan tanır. Zaman serisi analizi, bir otomatik akış şeması yerine gözlem sürecine ve gözlenen büyüklüklerin fiziksel özelliklerine dayanan bir spektral analiz yöntemi dizisidir. Örneğin, bir GNSS ölçme tekniğine dayalı bir zaman serisinde, önceden bilinen birinci veya ikinci dereceden bir polinomla açıklanabilen bir drift etkisi veya gelgit deformasyonunun var olduğunu

bilmek, bu ölçümlere ilişkin zaman serisi analizini kolaylaştırır. Bu şekilde, gözlenmek istenen yer değiştirme ve ilgili diğer zamansal değişkenler daha iyi analiz edilebilir. Aynı şekilde, gürültü türlerine ilişkin bir ön bilgi, yani WN+FN ya da WN+RWN türünde bir gürültü modelinin var olduğunu varsaymak zaman serisi analizinin etkinliğini arttırır. Otoregresyon kurallarına göre bu modellerin sürece nasıl dahil olduğu bilindiğinden, söz konusu gürültü modelinin daha iyi belirlenmesi gerçekleştirilir. Böylece, zaman serisi analizinde stokastik modelin bu varsayım altında gerçekçi bir şekilde belirlenmesi mümkün olur.

2.4.3 Stokastik Model

En küçük kareler ve maksimum olabilirlik kestirim yöntemi, çeşitli bilim dallarında en uygun kestirim işlemi için iyi bilinen tekniklerdir. Bu kestirim yöntemlerinde fonksiyonel model yanında stokastik modelin de gerçeğe yakın biçimde oluşturulması gerekir. Daha önce bahsedildiği üzere, zaman serileri analizinde söz konusu stokastik modeli tanımlayan kovaryans matrisin iyi bir şekilde belirlenmesi gerekir. Ölçüler (zamansal) korelasyonlu olduğuna göre, zaman serilerine ilişkin kovaryans matris de dolu bir matristir:

$$\mathbf{C}_{yy} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \cdots & \sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \cdots & \sigma_{nn-1}^2 & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Eşitlik (2.5)'teki güç spektrumu yaklaşımı altında bu kovaryans matris aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{C}_{yy} = \sigma_{\mathrm{WN}}^2 \mathbf{I} + \sigma_{\mathrm{FN}}^2 \mathbf{Q}_{\mathrm{FN}} + \sigma_{\mathrm{RWN}}^2 \mathbf{Q}_{\mathrm{RWN}} \tag{2.8}$$

Burada, σ_i, (i =WN, FN, RWN) gürültü büyüklüğü; $\mathbf{Q}_i$, (i= FN, RWN) ağırlık katsayıları matrisi ve $\mathbf{I}$, birim matristir. Ağırlık katsayıları matrisi $\mathbf{Q}_i$, Williams (2003b)'de gösterildiği gibi Hosking (1981)'in otoregresif yaklaşımıyla oluşturulabilir. Ancak, Eşitlik (2.8)'deki gürültü büyüklükleri önceden bilinmezler; her zaman serisi için farklı büyüklüklere sahiptir. Bu nedenle, σ_i^2 (i= WN, FN, RWN), GNSS zaman serilerinin analizinde bilinmeyen varyans bileşenleri (VCs) olarak alınır. Bu varyans bileşenleri, maksimum olabilirlik kestirimi (MLE) ile [5], [14], [15], [16], [17]) ya da Amiri-Simkooei (2007), Teunissen ve Amiri-Simkooei (2008) ve Amiri-Simkooei (2016)'da

gösterildiği gibi en küçük kareler varyans bileşenleri kestirim (LS-VCE) yöntemi ile belirlenebilir.

Ağırlık katsayıları matrisi $\mathbf{Q}_i$ aşağıdaki şekilde ifade edilir (Williams 2003b; Amiri Simkooei 2007):

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^T \qquad (i = \text{FN}, \text{RWN}) \tag{2.9}$$

Burada, $\mathbf{T}_i$=n×n dönüşüm matrisidir; Hosking (1981) tarafından otoregresif yaklaşıma göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (bkz., Williams 2003b):

$$\boldsymbol{T}_i = \Delta T^{-\kappa_i/4} \begin{bmatrix} \psi_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \psi_1 & \psi_0 & 0 & \dots & 0 \\ \psi_2 & \psi_1 & \psi_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \psi_n & \psi_{n-1} & \psi_{n-2} & \cdots & \psi_0 \end{bmatrix}, \; \psi_n = \frac{\Gamma\left(n - \frac{\kappa_i}{2}\right)}{n!\Gamma\left(-\frac{\kappa_i}{2}\right)} \quad , \quad (i = \text{FN}, \text{RWN}) \tag{2.10}$$

Burada, ΔT, örnekleme aralığı ve Γ, gama fonksiyonudur. Gama fonksiyonu $n \to \infty$ olduğu zaman çok büyük değer alır. Bu durumda ψ_n fonksiyonu yerine $\psi_n = n^{-\frac{\kappa_i}{2}-1}/\Gamma(-\frac{\kappa_i}{2})$ kullanılır.

Eşitlik (2.8) ile birlikte Eşitlik (2.4), bilinmeyen varyans bileşenli Gauss-Markoff modelini ifade eder. Kestirim işlemini tamamlamak için önce bu varyans bileşenleri kestirilmeli ve bunlarla ölçülerin kovaryans matrisi oluşturulmalıdır. Söz konusu varyans bileşenlerinin kestirimi için çalışmada kullanılan LS-VCE yöntemi aşağıda açıklanmaktadır.

2.4.4 LS-VCE Yöntemi

Varyans bileşenleri iteratif bir biçimde kestirilir [9], [17], [18]. Bilinmeyen varyans bileşenleri, $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma^2_{\text{WN}}\ \sigma^2_{\text{FN}}\ \sigma^2_{\text{RWN}}]$ vektöründe toplanırsa, kestirim işlemi aşağıdaki eşitliklere dayanır:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{N}^{-1}\boldsymbol{l} \tag{2.11a}$$

$$\mathbf{N}_{ik} = \frac{1}{2} iz(\mathbf{Q}_i \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{P}^{\perp} \mathbf{Q}_k \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{P}^{\perp}) \tag{2.11b}$$

$$\boldsymbol{l}_{ik} = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{Q}_k \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \hat{\mathbf{e}} \qquad (i, k = \text{WN}, \text{FN}, \text{RWN}) \tag{2.11c}$$

Burada, $\tilde{\mathbf{C}}_{yy}$, yaklaşık kovaryans matrisi; $\mathbf{P}^{\perp} = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^T\tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1}$ projeksiyon matrisi; $\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{P}^{\perp}\mathbf{y}$ en küçük kareler hata vektörü ve $\mathbf{Q}_{WN}$, birim matristir. İteratif kestirim işlemine, varyans çarpanları "1" alınarak başlanması yeterlidir. Dolayısıyla, kestirim işlemine $\tilde{\mathbf{C}}_{yy} = \mathbf{I} + \mathbf{Q}_{\mathrm{FN}} + \mathbf{Q}_{\mathrm{RWN}}$ yaklaşık kovaryans matrisiyle başlanır. Bu yaklaşık kovaryans matrisi yardımıyla, yukarıdaki eşitliklerden varyans bileşenleri kestirilir ve bunlar yardımıyla yeni yaklaşık kovaryans matrisi Eşitlik (2.8)'den belirlenir ve benzer kestirim işlemleri ardışık iterasyonlardaki varyans bileşenleri aynı oluncaya kadar sürdürülür. Kestirilen varyans bileşenlerinin kovaryans matrisi, doğrudan $\mathbf{C}_{\sigma} = \mathbf{N}^{-1}$ şeklinde belirlenir.

Yukarıdaki işlemler sonucunda belirlenen kovaryans matrisi, Eşitlik (2.8)'deki regresyon modelinde düşünülür ve $\mathbf{C}_{yy}^{-1}$ ağırlık matrisi kullanılarak en küçük kareler yöntemi uygulanır ([10], [11]); bilinmeyenler ($\mathbf{x}$) ve bunların kovaryans matrisi ($\mathbf{C}_{xx}$) belirlenir:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T\mathbf{C}_{yy}^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{C}_{yy}^{-1}\mathbf{y} \tag{2.12}$$

$$\mathbf{C}_{xx} = (\mathbf{A}^T\mathbf{C}_{yy}^{-1}\mathbf{A})^{-1} \tag{2.13}$$

Varyans bileşenlerinin kestirimi sonucunda ağırlıklandırma işleminde birim ağırlıklı ölçünün varyansını kullanmaya gerek yoktur; çünkü ölçülerin kovaryans matrisi öngörülen gürültü modeli altında gerçekçi bir şekilde halihazırda kestirilmiştir. Söz konusu işlem sonrasında en küçük kareler dengelemesi ile elde edilen sonsal varyans, bu nedenle, "1" değerine gider (Aydın 2007) Ancak, daha önce bahsedildiği üzere, söz konusu Gauss-Markoff modelinde tüm varyans bileşenlerini elde etmek mümkün olmayabilir. Bu durumda, Amiri-Simkooei (2016) tarafından oluşturulmuş NN-LSVCE (non-negative LSVCE) algoritması ele alınabilir. Çalışmada söz konusu algoritma çözümlere dahil edilmiştir.

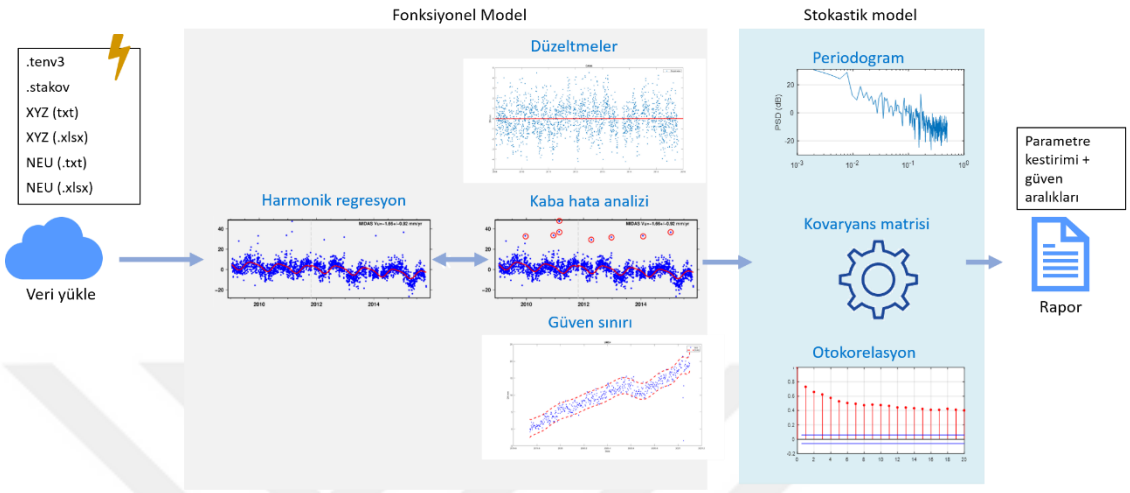
3

GNSS ZAMAN SERİLERİ ANALİZ YAZILIMI: GEOTSATOOL

GNSS zaman serileri gerek CORS gerekse özel amaçlarla üretilmiş GNSS istasyonlarının yaygınlaşması nedeniyle, jeodezik uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu zaman serileri, özellikle yerkabuğu ya da büyük mühendislik yapılarındaki deformasyonların incelenmesinde önemli bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Her zaman serisi farklı bir karaktere sahiptir ve üzerinde tek tek çalışarak analiz edilmelidir. GNSS zaman serilerinde uygulanan kestirim işlemlerinde yalnız fonksiyonel modelin dikkatle alınması yetmez; gürültü modelinin, dolayısıyla stokastik modelin de aynı hassasiyette ve özelde çalışılması gereklidir. Söz konusu zaman serilerinin bu şekilde analiz edilmesi için uygulamada kullanılan yazılımlar hem kullanıcı dostu olmadıkları hem de içerisinde kullanılan fonksiyonlara müdahale edilme imkânı tanımadıkları için araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde sınırlı bir yaygın etkiye sahiptir. Bu amaçla, tezin önemli bir parçası olarak, hem GNSS zaman serilerini analiz etmek hem de sürece etkiyen gürültüyü modellemek, böylece önemli bir parametre olan hız belirsizliklerinin (standart hatalarının) gerçeğe en uygun şekilde belirlenmesini sağlamak amacıyla GEOTSATOOL adlı bir yazılım paketi geliştirilmiştir.

GEOTSATOOL, teknik hesaplama için son derece uygun olan mimarisi nedeniyle MATLAB ortamında geliştirilmiştir. MATLAB, matris tabanlı yapısı ve yerleşik grafikleri aracılığıyla verilerin programlanması, hesaplanması ve görselleştirilmesi için üst düzey bir dil olması yanında oldukça pratik ve akademik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, yazılımın grafik kullanıcı arayüzü (GUI), bir kullanıcı arayüzünün görsel bileşenlerini tasarlamak ve geliştirmek için özel bir ortam olan MATLAB GUIDE kullanılarak geliştirildiğinden, MATLAB sürümü 2016a veya daha üst bir versiyonunda çalışmaktadır. Uygulamanın kullanıcı ara yüzlü olması yazılımın kullanıcı dostu olmasını sağlamaktadır. MATLAB çekirdek dosyalarına ek olarak, GEOTSATOOL herhangi bir

ek MATLAB toolbox'a ihtiyaç duymaz. Bu, yazılımın hafif ve kurulumu kolay olmasını sağlayarak geniş bir kullanıcı yelpazesi için erişilebilir olmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.1 GEOTSATOOL temel bileşen ve fonksiyonları akış diagramı

GEOTSATOOL temel olarak 4 ana bileşenden oluşur (bkz. Şekil 3.1):

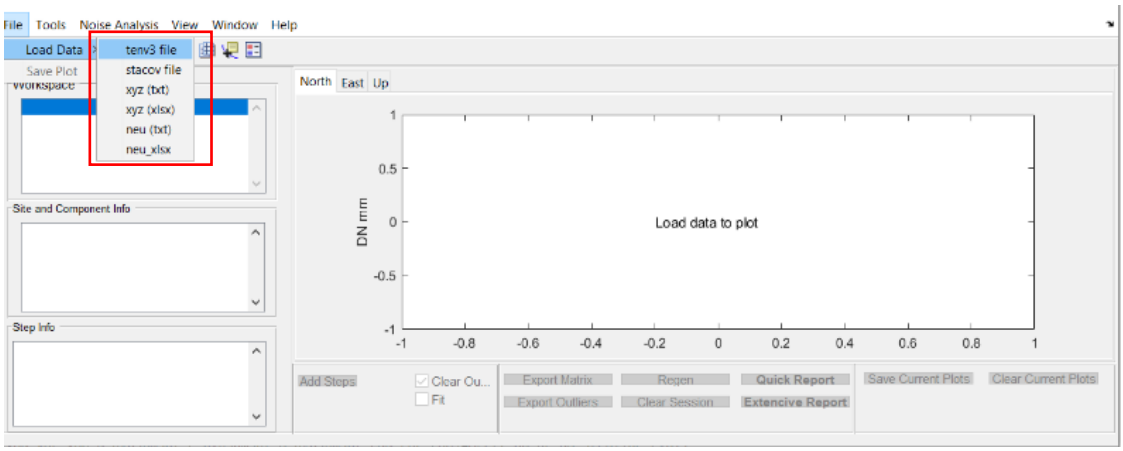
- Veri Yükleme,
- Fonksiyonel model (hız kestirimi),
- Stokastik model (gürültü analizi)
- Raporlama.

Bu bileşenler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

3.1 Veri Yükleme

GNSS zaman serileri analizi için ilke olarak ihtiyaç duyulan veri formatı, bir noktanın farklı epoklardaki konum bilgisini veya yer değişimini içeren veri formatıdır. GEOTSATOOL mevcut hali ile Şekil 3.2'de gösterildiği üzere 5 farklı veri formatı desteklemektedir:

- tnv3 formatı: Nevada jeodezik laboratuvarı web sayfasından (URL-1) elde edilmektedir (bkz. Şekil 3.3)
- txt formatı: kartezyen (X,Y,Z) veya projeksiyon (N,E,U) koordinat sistemi koordinatları (bkz., Şekil 3.4),
- xlsx formatı: kartezyen (X,Y,Z) veya projeksiyon (N,E,U) koordinat sistemi (bkz. Şekil 3.5).



Şekil 3.2 GEOTSATOOL veri formatı

YLDZ.tenv3 - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

```
site YYMMMDD yyyy.yyyy __MJD week d reflon _e0(m) __east(m) ____n0(m) _north(m) u0(m) ____up(m) _ant(m) sig_e(m) sig_n(m) sig_u(m) __corr_en __corr_eu __corr_nu
YLDZ 14AUG01 2014.5818 56870 1803 5   28.9   -946 -0.714179   4543154  0.009400   126  0.936322  0.1390 0.001073 0.001282 0.004537 -0.136698  0.031838 -0.057127
YLDZ 14AUG02 2014.5845 56871 1803 6   28.9   -946 -0.714910   4543154  0.007093   126  0.951637  0.1390 0.001127 0.001295 0.004777 -0.127682 -0.013466 -0.113483
YLDZ 14AUG03 2014.5873 56872 1804 0   28.9   -946 -0.715088   4543154  0.003680   126  0.945324  0.1390 0.001105 0.001356 0.004696 -0.190942  0.066884 -0.164758
YLDZ 14AUG04 2014.5900 56873 1804 1   28.9   -946 -0.716733   4543154  0.005822   126  0.946762  0.1390 0.001082 0.001278 0.004587 -0.134354  0.040863 -0.074609
YLDZ 14AUG06 2014.5955 56875 1804 3   28.9   -946 -0.715669   4543154  0.008459   126  0.948761  0.1390 0.001080 0.001309 0.004572 -0.171256  0.101802 -0.150308
YLDZ 14AUG07 2014.5982 56876 1804 4   28.9   -946 -0.716820   4543154  0.011666   126  0.935812  0.1390 0.001111 0.001361 0.004857 -0.117604  0.059748 -0.107794
YLDZ 14AUG08 2014.6010 56877 1804 5   28.9   -946 -0.715427   4543154  0.008860   126  0.944106  0.1390 0.001126 0.001377 0.004808 -0.107951  0.032109 -0.037067
YLDZ 14AUG13 2014.6146 56882 1805 3   28.9   -946 -0.716064   4543154  0.005033   126  0.938790  0.1390 0.001255 0.001538 0.005526 -0.048201 -0.108362 -0.165408
YLDZ 14AUG14 2014.6174 56883 1805 4   28.9   -946 -0.716636   4543154  0.006065   126  0.949784  0.1390 0.001131 0.001284 0.004737 -0.131648  0.034136 -0.078904
YLDZ 14AUG15 2014.6201 56884 1805 5   28.9   -946 -0.714665   4543154  0.004752   126  0.947673  0.1390 0.001099 0.001263 0.004560 -0.151066  0.072137 -0.136466
YLDZ 14AUG16 2014.6229 56885 1805 6   28.9   -946 -0.715077   4543154  0.007408   126  0.941261  0.1390 0.001096 0.001256 0.004490 -0.147258  0.037782 -0.096465
YLDZ 14AUG17 2014.6256 56886 1806 0   28.9   -946 -0.712975   4543154  0.007344   126  0.949686  0.1390 0.001144 0.001313 0.005014 -0.082515 -0.017452 -0.089423
YLDZ 14AUG18 2014.6283 56887 1806 1   28.9   -946 -0.715356   4543154  0.008024   126  0.950075  0.1390 0.001109 0.001326 0.004643 -0.155668  0.080986 -0.109910
YLDZ 14AUG19 2014.6311 56888 1806 2   28.9   -946 -0.716900   4543154  0.008527   126  0.950577  0.1390 0.001109 0.001310 0.004611 -0.104915  0.051207 -0.075839
YLDZ 14AUG20 2014.6338 56889 1806 3   28.9   -946 -0.715276   4543154  0.007912   126  0.943643  0.1390 0.001115 0.001294 0.004506 -0.159538  0.067973 -0.110931
YLDZ 14AUG21 2014.6366 56890 1806 4   28.9   -946 -0.713752   4543154  0.006539   126  0.947244  0.1390 0.001107 0.001311 0.004523 -0.140061  0.060250 -0.120307
YLDZ 14AUG22 2014.6393 56891 1806 5   28.9   -946 -0.712449   4543154  0.005603   126  0.942472  0.1390 0.001103 0.001320 0.004583 -0.130624  0.076643 -0.125599
YLDZ 14AUG23 2014.6420 56892 1806 6   28.9   -946 -0.713219   4543154  0.009629   126  0.948707  0.1390 0.001095 0.001310 0.004499 -0.120344  0.026567 -0.099215
YLDZ 14AUG24 2014.6448 56893 1807 0   28.9   -946 -0.716275   4543154  0.008120   126  0.945716  0.1390 0.001139 0.001339 0.004717 -0.154020  0.096509 -0.067762
YLDZ 14AUG25 2014.6475 56894 1807 1   28.9   -946 -0.713362   4543154  0.007458   126  0.935706  0.1390 0.001131 0.001366 0.004852 -0.117697  0.041384 -0.095182
YLDZ 14AUG26 2014.6502 56895 1807 2   28.9   -946 -0.714259   4543154  0.008301   126  0.940748  0.1390 0.001137 0.001357 0.004717 -0.129148  0.079916 -0.055591
YLDZ 14AUG27 2014.6530 56896 1807 3   28.9   -946 -0.713390   4543154  0.006520   126  0.937055  0.1390 0.001116 0.001314 0.004686 -0.157168  0.109445 -0.068261
YLDZ 14AUG28 2014.6557 56897 1807 4   28.9   -946 -0.713493   4543154  0.008533   126  0.939729  0.1390 0.001111 0.001300 0.004497 -0.139859  0.120439 -0.103967
YLDZ 14AUG29 2014.6585 56898 1807 5   28.9   -946 -0.713913   4543154  0.008614   126  0.950552  0.1390 0.001176 0.001296 0.004785 -0.157637  0.060660 -0.096496
YLDZ 14AUG30 2014.6612 56899 1807 6   28.9   -946 -0.713280   4543154  0.010226   126  0.940553  0.1390 0.001116 0.001282 0.004614 -0.122732  0.025837 -0.025715
```

Şekil 3.3 Nevada jeodezi laboratuarından elde edilen tnv3 uzantılı veri formatı örnek dosya

```
Sname    Ti       X          Y          Z
OSM      2012.0082       3606145.9754     875303.4559      5170194.0252
OSM      2012.0931       3606145.9625     875303.4555      5170194.0105
OSM      2012.1725       3606145.9762     875303.4573      5170194.0295
OSM      2012.2601       3606145.9706     875303.4569      5170194.0270
OSM      2012.3395       3606145.9788     875303.4589      5170194.0426
OSM      2012.4244       3606145.9722     875303.4603      5170194.0349
OSM      2012.5092       3606145.9674     875303.4612      5170194.0313
OSM      2012.5914       3606145.9707     875303.4634      5170194.0332
OSM      2012.6762       3606145.9741     875303.4652      5170194.0402
OSM      2012.7584       3606145.9710     875303.4666      5170194.0399
OSM      2012.8433       3606145.9657     875303.4699      5170194.0350
```

Şekil 3.4 XYZ txt uzantılı veri format örnek dosya

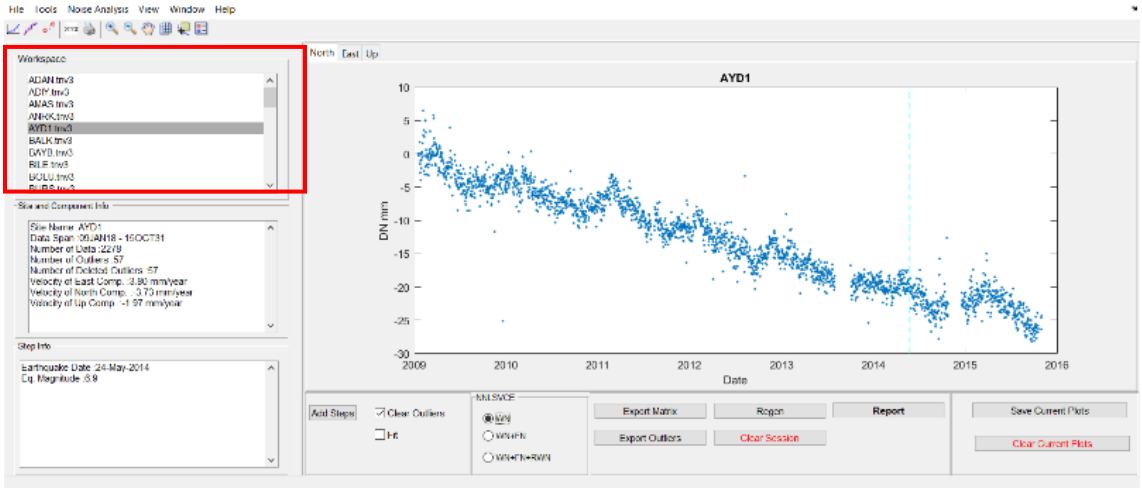
	A	B	C	D	E
1	Sname	Ti	X	Y	Z
2	SASS	2012.0082	3606145.9754	875303.4559	5170194.0252
3	SASS	2012.0931	3606145.9625	875303.4555	5170194.0105
4	SASS	2012.1725	3606145.9762	875303.4573	5170194.0295
5	SASS	2012.2601	3606145.9706	875303.4569	5170194.0270
6	SASS	2012.3395	3606145.9788	875303.4589	5170194.0426
7	SASS	2012.4244	3606145.9722	875303.4603	5170194.0349
8	SASS	2012.5092	3606145.9674	875303.4612	5170194.0313
9	SASS	2012.5914	3606145.9707	875303.4634	5170194.0332
10	SASS	2012.6762	3606145.9741	875303.4652	5170194.0402

Şekil 3.5 XYZ xlsx uzantılı veri format örnek dosya

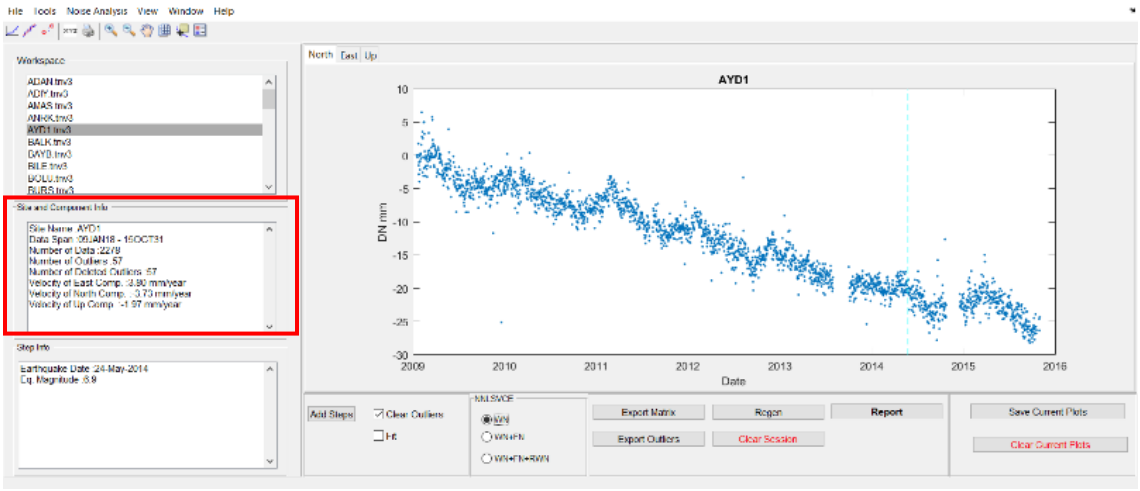
3.2 Fonksiyonel Model (Hız Kestirimi)

GEOTSATOOL dört temel panel ve harici fonksiyonlardan oluşmaktadır: Söz konusu paneller şöyledir:

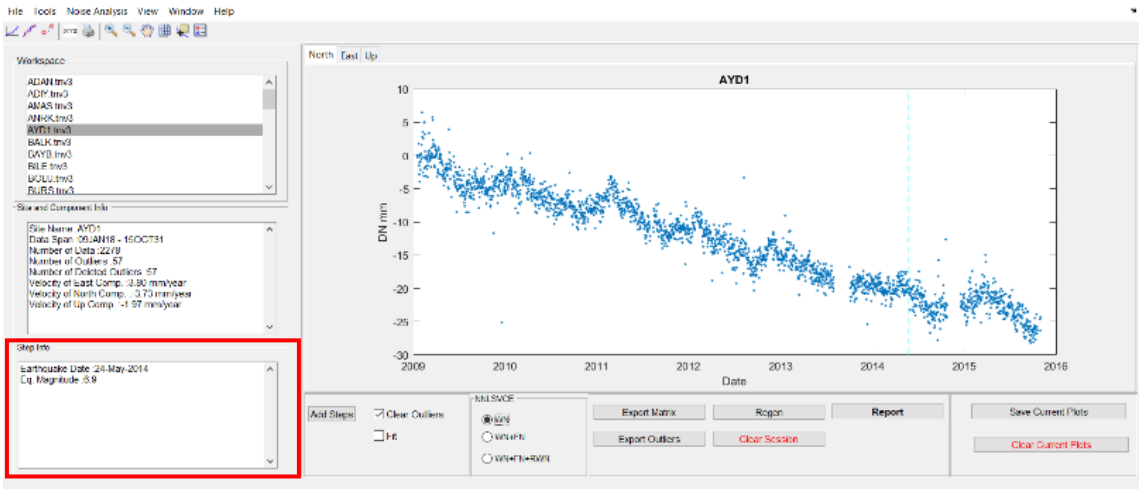
1. Verilerin bulunduğu çalışma klasörünün seçilmesinin ardından çalışma klasöründe yer alan istasyonların görüntülendiği çalışma alanı paneli (Şekil 3.6),
2. Seçili istasyona ilişkin veri ayrıntıları ve hızlı analiz sonuçların yer aldığı (kaba hatalı ölçü sayısı, bileşen hızları) site ve bileşen bilgileri paneli (Şekil 3.7),
3. Seçili istasyona ilişkin-varsa veride bulunan ofset bilgilerinin (Ofset bilgileri tüm istasyonlara ilişkin ofset bilgilerinin bulunduğu "steps" dosyası içerisinden çekilmektedir. Harici ofset bilgisi eklenilmek istenildiği taktirde "Add Steps" fonksiyonu kullanılmalıdır (Şekil 3.8),
4. Seçili istasyona ait her bir bileşene (N, E, U) ait zaman serilerinin görüntülenebileceği grafik paneldir (Şekil 3.9).



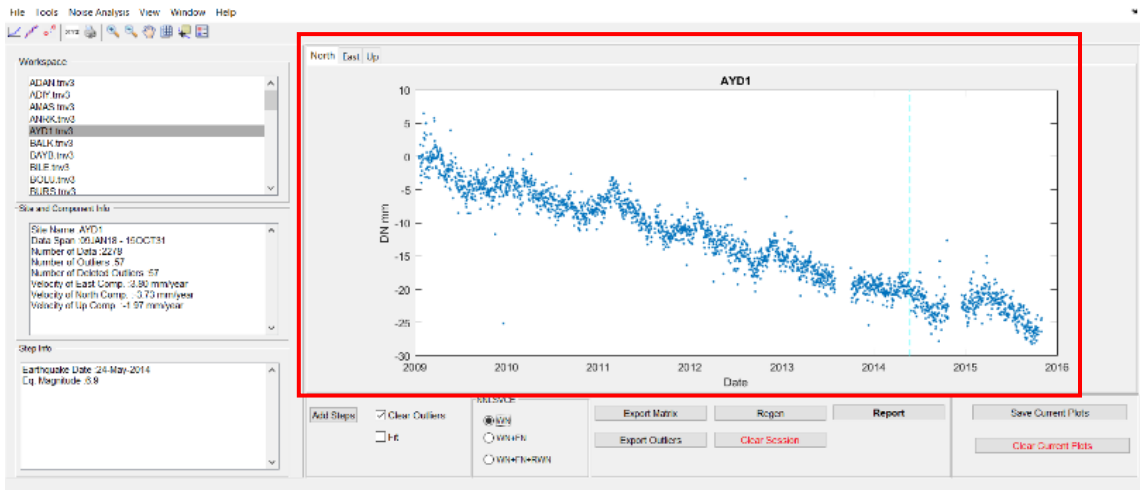
Şekil 3.6 Çalışma alanı paneli (verilerin bulunduğu klasörde yer alan istasyon verileri)



Şekil 3.7 İstasyon ve bileşen bilgileri paneli (veri ayrıntıları, kaba hatalı ölçü sayısı ve bileşen hızları)



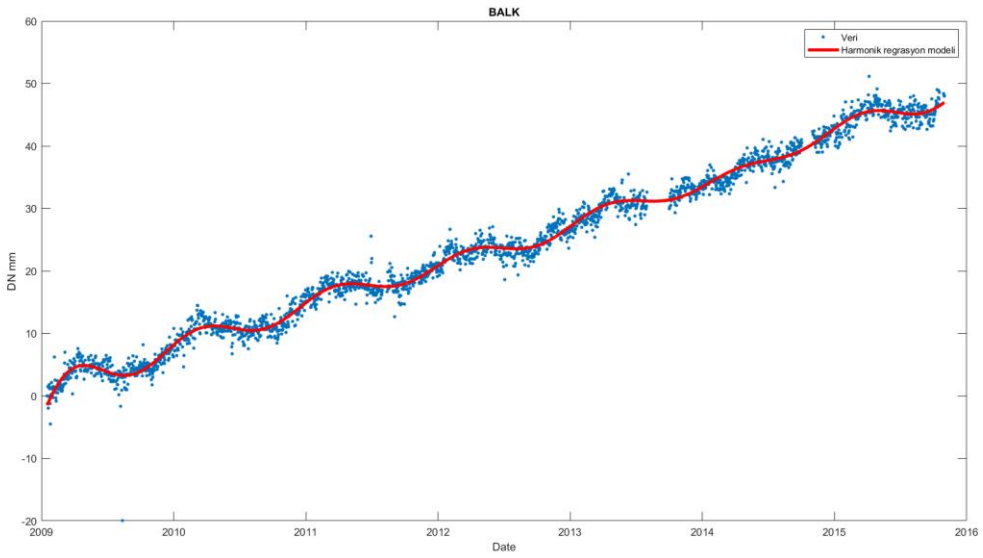
Şekil 3.8 Seçili istasyona ilişkin ofset bilgileri paneli (veride bulunan ofset zamanları ve ayrıntıları)



Şekil 3.9 Seçili istasyon bileşenlerinin (N, E, U) zaman serileri grafiklerini içeren grafik paneli

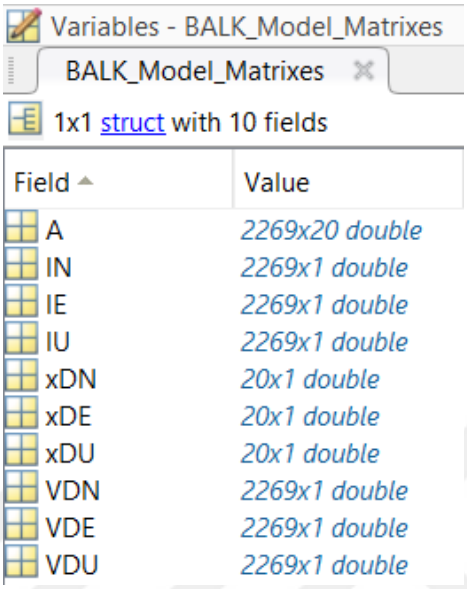
3.2.1 Harmonik Regresyon

GEOTSATOOL yazılımında GNSS zaman serilerinin modellenmesi önceki bölümlerde açıklanan harmonik regresyon modeline dayanmaktadır. İstasyon seçimin ardından model veriye otomatik olarak uygulanır: Söz konusu regresyonda, sıfır eki, hız, periyodik bileşenler (Bogusz ve Klos (2016)'da belirtilmiş yıllık ve yarı-yıllık sinyaller yanında draconitic, Chandler sinyaller) dikkate alınmaktadır. Bu regresyon sonucu, istenildiği taktirde araçlar bölümünden "Fit" seçeneği açılarak grafik üzerinde görüntülenebilir (Şekil 3.10). Kullanılan modele ilişkin denklem ve katsayı değerleri rapor dosyasında görüntülenebilmektedir.



Şekil 3.10 "Fit" fonksiyonu ile elde edilmiş regresyon grafiği örneği

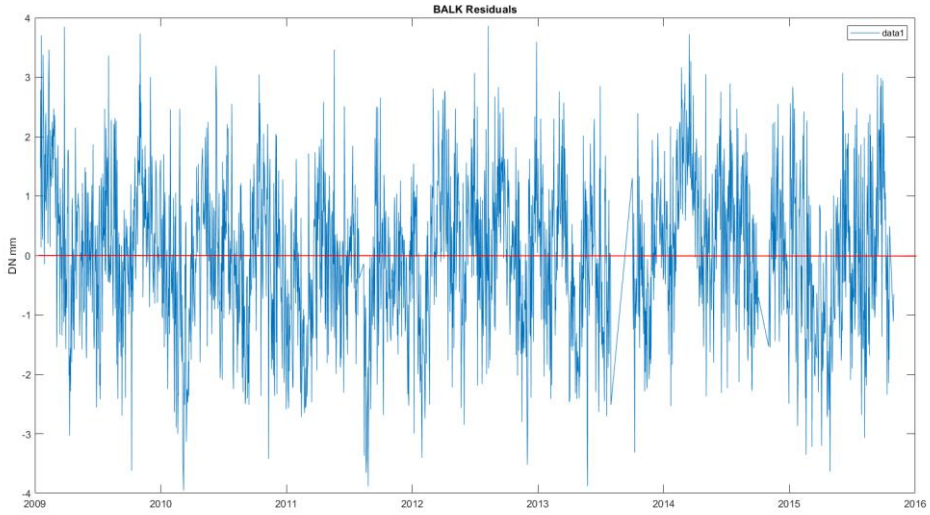
Kullanılan modele ilişkin katsayılar matrisi, ölçü vektörü, düzeltmeler ve bilinmeyenler gibi elemanlar, “Export Matrix” fonksiyonu ile elde edilip görüntülenebilmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 “Export Matrix” fonksiyonu fonksiyonel modele ilişkin matris ve vektör sonuçları örneği

3.2.2 Düzeltmeler

Fonksiyonel modelin kurulmasının ardından düzeltmeler önceki bölümlerde açıklanan en küçük kareler eşitlikleri yardımıyla elde edilmektedir. Düzelmelerin zaman alanında dağılımı verinin gürültü özelliklerinin ilk tanısının yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir. Veriye ilişkin düzeltmeler araçlar bölümünden “Residuals” fonksiyonu ile grafik olarak görüntülenmekte (bkz. Şekil 3.12), düzeltme vektörleri “Export Matrix” fonksiyonu ile elde edilmektedir (VDN, VDE, VDE; bkz. Şekil 3.11).

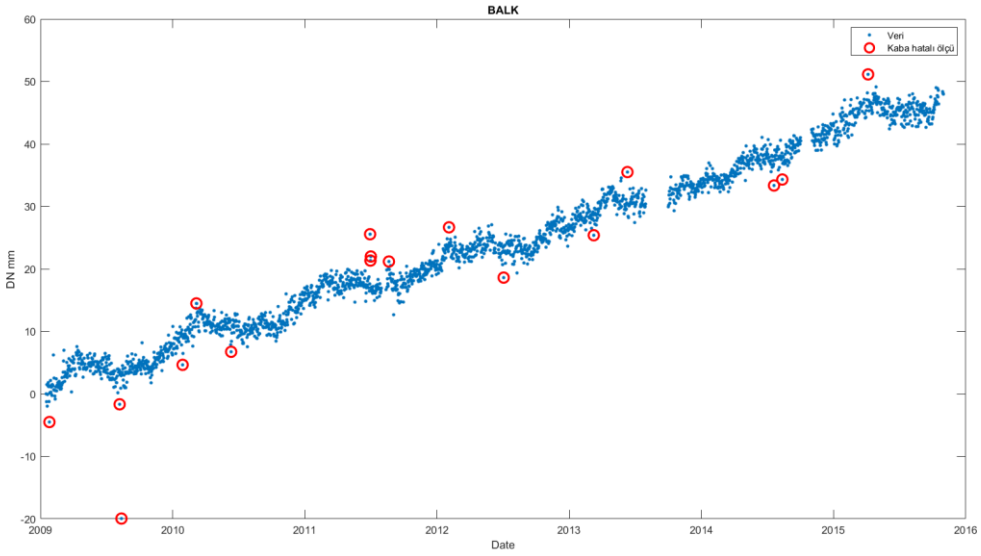


Şekil 3.12 "Residuals" fonksiyonu ile çizdirilen düzeltmelerin bir örnek grafiği

3.2.3 Kaba Hata Analizi

Zaman serilerinde yer alan koordinatlar ya da koordinat değişimleri, GNSS istasyonundaki dış etkiler nedeniyle çeşitli kaba hatalarla yüklü olabilir. Regresyon analizinin ve daha sonra gerçekleştirilecek gürültü modeli incelemesinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için söz konusu kaba hatalı ölçülerin zaman serisinden temizlenmesi gerekmektedir.

Programda kaba hata analizi, jeodezik zaman serilerinde oldukça sık kullanılan MAD (Mutlak Medyan Sapması-Median Absolute Deviation) yöntemine göre yapılmaktadır. Bu yöntemde, öncelikle **d**=|**e**-medyan(**e**)| mutlak sapma vektörü oluşturulur. Bu sapma vektörü elemanlarından "1.4826×medyan(**d**)" büyüklüğünü aşanlar varsa bu elemanlara karşılık gelen ölçüler kaba hatalı olarak tanımlanır. Kaba hatalı ölçülerin elde edilmesinin ardından bu ölçüler veriden temizlenerek model tekrar oluşturulur. Kaba hatalı ölçülerin temizlenmesi işlemi, varsayılan bir işlem olmakla birlikte, isteğe bağlı olarak analiz sırasında kullanılmaması da sağlanabilmektedir. Verideki kaba hatalı ölçüler araçlarda bulunan "Show Outliers" fonksiyonu ile grafik üzerinde görüntülenebilmekte (bkz., Şekil 3.13) ve "Export Outliers" fonksiyonu ile kaba hatalı ölçüler dışarı aktarılabilmektedir.



Şekil 3.13 "Show Outliers" fonksiyonu ile çizdirilen örnek bir kaba hatalı ölçü grafiği

3.3 Stokastik Model (Gürültü Analizi)

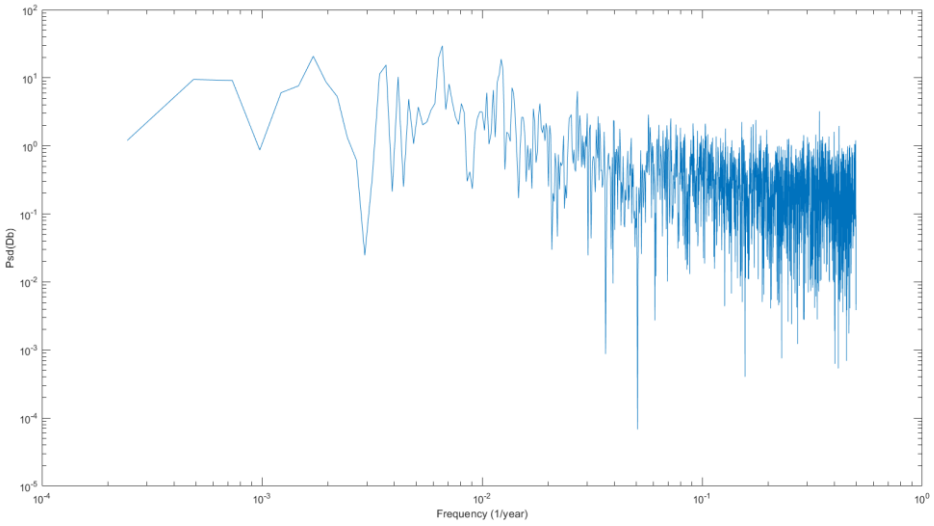
Önceki bölümde gerçekleştirilen regresyon ve kaba hata analizi işlemleri sonucunda elde edilen düzeltmeler üzerinden zaman serisindeki gürültünün analizi gerçekleştirilir. Söz konusu gürültünün özelliklerini inceleyebilmek için iki önemli ön analiz gerekir,

- PSD grafiklerinin oluşturulması,
- Otokorelasyon grafiğinin oluşturulması.

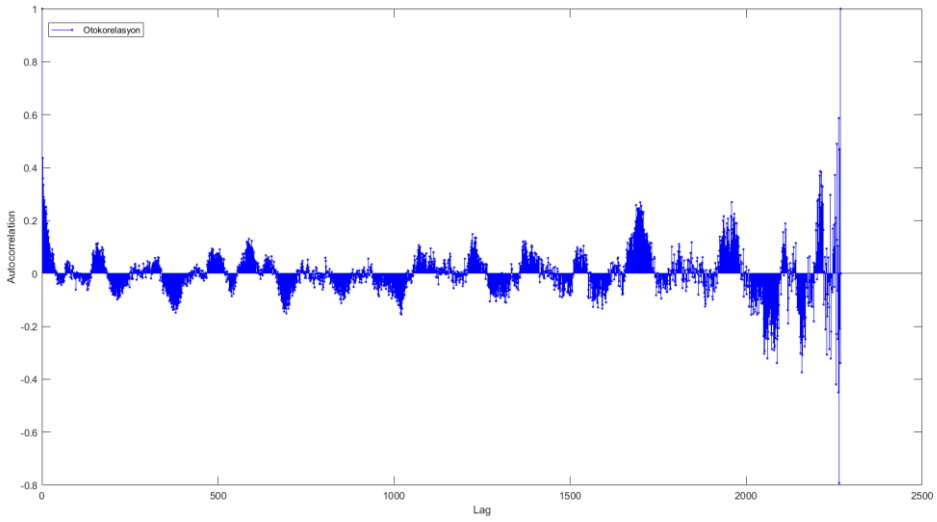
Kullanıcı, "periyodogram" ve "otokorelasyon" seçenekleriyle elde edilen düzeltmeleri frekans alanında inceleyebilmektedir. Periyodogram fonksiyonu ile düzeltmelerin log-log PSD grafiği çizilmektedir. Zaman serisi analizinde söz konusu grafik, i) gürültü türünün anlaşılması, ii) regresyonda ihmal edilmiş periyodik bir sinyalin ortaya çıkarılması için kullanılır. GEOTSATOOL, çalışmada gerçekleştirilen haliyle, ek ya da özel bir periyodik sinyalin analizini içermemektedir. Dolayısıyla, bu versiyonuyla "periyodogram" fonksiyonunun amacı, kullanıcının gürültü türünün ön tanısını yapabilmesidir. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, bu grafiğin eğimi (bkz. Şekil 3.14) ile GNSS zaman serisindeki gürültünün modelinin ne olması gerektiğine ilişkin bir ön bilgi elde edilir. -2'lik bir eğime yaklaştıkça, rasgele yürüyüş gürültüsünün varlığını da göz ardı etmemek gerekir. Gürültü türünün anlaşılması için PSD grafiği tek başına yeterli olmaz. Otokorelasyon grafiklerini de incelemek gerekir.

GEOTSATOOL içindeki “otokorelasyon” seçeneği ile zaman serisi düzeltmelerinin otokorelasyon grafiği çizdirilmektedir (bkz. Şekil 3.15). Bu grafikte, yaklaşık olarak farklı laglardaki otokorelasyonların “$2/T^{1/2}$” üzerinde olması durağan olmayan (zamana bağlı olan) modellenememiş bir etkinin analizde giderilmediğini gösterir. Dalgalı bir otokorelasyon yapısı, genelde modellenememiş periyodik bir sinyale karşılık gelirken, düşük lag’dan yüksek laga doğru azalan yüksek otokorelasyon kırpışma gürültüsüne, neredeyse %100 (1) büyüklüğündeki otokorelasyonlar rasgele yürüyüş gürültüsüne karşılık gelir. Ancak, bunların bir arada bulunmaları durumunda genliklerinin büyüklüğüne bağlı olarak bu standart biçimlerden farklı biçimler gözlenebilmektedir.

Gürültü modeline karar verme işlemi, tek bir analiz sonucuna bağlı olarak gerçekleştirilebilen bir işlem değildir; çoğunlukla tecrübelere bağlıdır. GNSS zaman serilerinde genelde WN+FN gürültü modeli, istasyonun yerel sebeplerden ötürü yüksek miktarlarda gürültülü olması durumunda ise WN+FN+RWN modeli kullanılır. GEOTSATOOL yazılımı, bu iki gürültü modeline göre çalışabilmektedir. Şekil 3.16’da gösterildiği gibi, bu iki modelden biri seçilerek gürültü analizi yapılmaktadır.



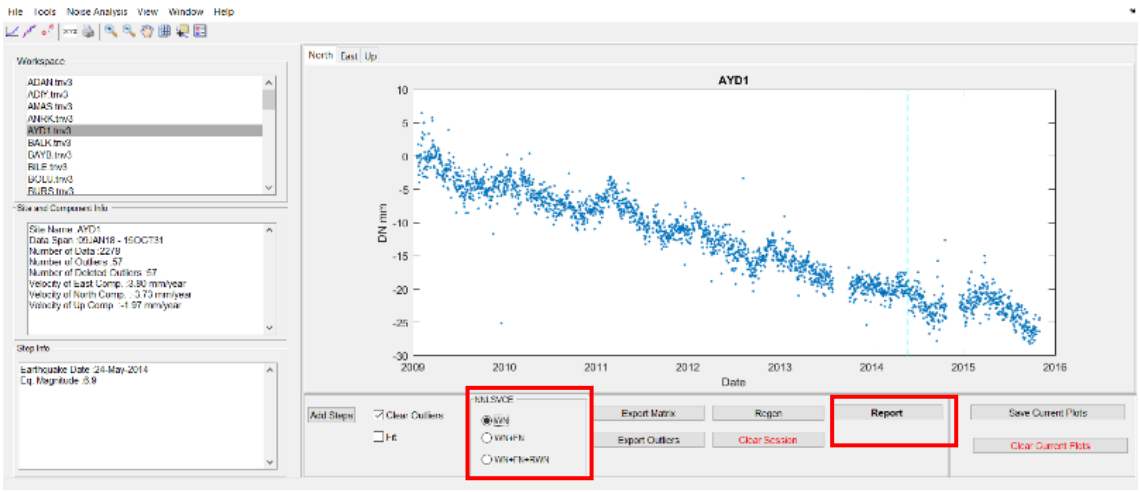
Şekil 3.14 “Periodogram” fonksiyonu ile elde edilen örnek bir PSD grafiği



Şekil 3.15 "Otokorelasyon" fonksiyonu ile elde edilen düzeltmelere ait örnek bir otokorelasyon grafiği

3.4 Sonuçların Raporlanması

Yukarıdaki işlemler sonucunda gürültü modeline karar verildikten sonra, Şekil 3.16'daki modellerden biri seçilir ve "report" ile sonuçların bulunduğu rapor dosyası oluşturulur.



Şekil 3.16 Gürültü türü seçimi ve rapor fonksiyonu

Rapor dosyası,4 bölümden oluşmaktadır:

1. Özet bilgilerin yer alığı başlık bölümü (bkz., Şekil 3.17).
2. Doğu bileşeni kestirim değerleri ve standart sapmaları bölümü (bkz., Şekil 3.18).
3. Kuzey bileşeni kestirim değerleri ve standart sapmaları bölümü (bkz., Şekil 3.18).
4. Yükseklik bileşeni kestirim değerleri ve standart sapmaları bölümü (bkz., Şekil 3.18).

```
                                    GEOTSATOOT REPORT FILE
CREATION DATE:04-Sep-2023
-------------------------------------------------------------------------------------------------------
STATION NAME             :        AYD1                    EAST VELOCITY :  3.70 +/- 0.07 mm/year
FUNCTIONAL MODEL         : Harmonic R.                   NORTH VELOCITY : -3.73 +/- 0.02 mm/year
STOCHASTIC MODEL         :     NNLSCVE                      UP VELOCITY : -2.74 +/- 0.02 mm/year
NUMBER OF OBSERVATIONS   :      2278                     S.INDEX EAST :-0.55
DATA SPAN                : 09JAN16- 15OCT31             S.INDEX NORTH :-0.55
NUMBER OF OUTLIERS       :        51                       S.INDEX UP :-0.48
NUMBER OF UNKNOWNS       :        19                     NNLSVCE EAST :WN+FN
NUMBER OF STEPS          :         1                     NNLSVCE NOTH :WN
APPROXİMATE LAT          :  37.84073                       NNLSVCE UP :WN+FN
APPROXİMATE LONG         :-332.16212                        EAST VCs :1.18/0.68/0.00
APPROXİMATE h            :    101.84                       NORTH VCs :1.67/0.00/0.00
                                                             UP VCs :4.82/2.26/0.00
-------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

Şekil 3.17 Hız kestirimi, standart hata sonuçları ve gürültü modeline ilişkin bilgilerin yer aldığı örnek rapor dosyası başlık bölümü (AYD1 istasyonu zaman serisi verilerine ilişkin kullanılan fonksiyonel model, ölçü ve kaba hatalı ölçü sayısı, ofset bilgileri, kestirim sonuçları ve standart sapmaları)

[EAST COMPONENT]

CN	Unkown Val	Qxx[i i]	Unknown Uncertainty
a0	-1.2166	0.2775	0.2499
o1	0.2275	0.5521	0.3524
o2	-3.1393	0.5304	0.3455
a1	3.5617	0.0677	0.1234
a2	0.4680	0.2239	0.2245
a3	0.2552	0.1981	0.2111
a4	0.0390	0.0154	0.0588
a5	-0.2142	0.0155	0.0590
a6	-0.0899	0.0596	0.1158
a7	-0.1467	0.0643	0.1203
a8	-0.0033	0.2271	0.2261
a9	-0.0309	0.1870	0.2051
a10	-0.0128	0.0052	0.0341
a11	0.0560	0.0052	0.0341
a12	-0.0413	0.0052	0.0341
a13	0.0026	0.0051	0.0339
a14	-0.0746	0.0052	0.0341
a15	-0.0528	0.0052	0.0341
a16	0.0022	0.0052	0.0341
a17	0.0219	0.0051	0.0340

(a)

[NORTH COMPONENT]

CN	Unkown Val	Qxx[i i]	Unknown Uncertainty
a0	0.5681	0.1463	0.3423
o1	0.6796	0.3782	0.5503
o2	1.0685	0.3917	0.5600
a1	6.7102	0.0387	0.1761
a2	-0.1156	0.3579	0.5353
a3	0.7344	0.2720	0.4667
a4	-0.2587	0.0332	0.1630
a5	-0.2229	0.0328	0.1619
a6	-0.1511	0.0737	0.2429
a7	-0.1573	0.1031	0.2873
a8	0.2063	0.3045	0.4938
a9	1.0199	0.3271	0.5117
a10	-0.0475	0.0015	0.0345
a11	0.0376	0.0015	0.0345
a12	0.0088	0.0015	0.0343
a13	0.0263	0.0015	0.0342
a14	-0.0490	0.0015	0.0346
a15	0.0512	0.0015	0.0345
a16	-0.0730	0.0015	0.0341
a17	-0.0328	0.0014	0.0340

(b)

[UP COMPONENT]

CN	Unkown Val	Qxx[i i]	Unknown Uncertainty
a0	6.1700	1.2810	0.3375
o1	0.2627	3.3245	0.5426
o2	-1.2478	3.3007	0.5521
a1	-0.3137	0.3407	0.1736
a2	-3.8678	1.6041	0.5277
a3	-3.0331	1.3506	0.4601
a4	0.6585	0.1791	0.1607
a5	0.6067	0.1834	0.1597
a6	-0.0429	0.3653	0.2395
a7	-0.6203	0.4032	0.2832
a8	-0.7283	1.5238	0.4868
a9	-0.2032	1.4635	0.5045
a10	-0.0674	0.0244	0.0340
a11	-0.1147	0.0246	0.0340
a12	-0.0159	0.0241	0.0339
a13	0.0783	0.0238	0.0337
a14	-0.0298	0.0247	0.0341
a15	0.3087	0.0246	0.0340
a16	0.4148	0.0234	0.0336
a17	0.2117	0.0235	0.0335

(c)

Şekil 3.18 Her bir bileşen için (a-doğu, b-kuzey, c yükseklik) fonksiyonel modelde geçen bilinmeyenler ve standart hataları örnek rapor dosyası

Her bir bileşen için kestirim sonuçlarının yer aldığı rapor dosyasında (bkz. Şekil 3.18) a0, a1,…an şeklinde devam eden ifadeler kuramsal dayanağı bir önceki bölümlerde anlatılan harmonik regresyon modeli katsayılarına karşılık gelmektedir; a1 değeri ise her bir bileşen için hız büyüklüğünü mm/yıl cinsinden ifade etmektedir. Yine Şekil 3.18'de gözüken o1, o2, …on şeklinde devam eden ifadeler ise zaman serisi verisindeki ofset değerleri bilinmeyenlerine karşılık gelmektedir.

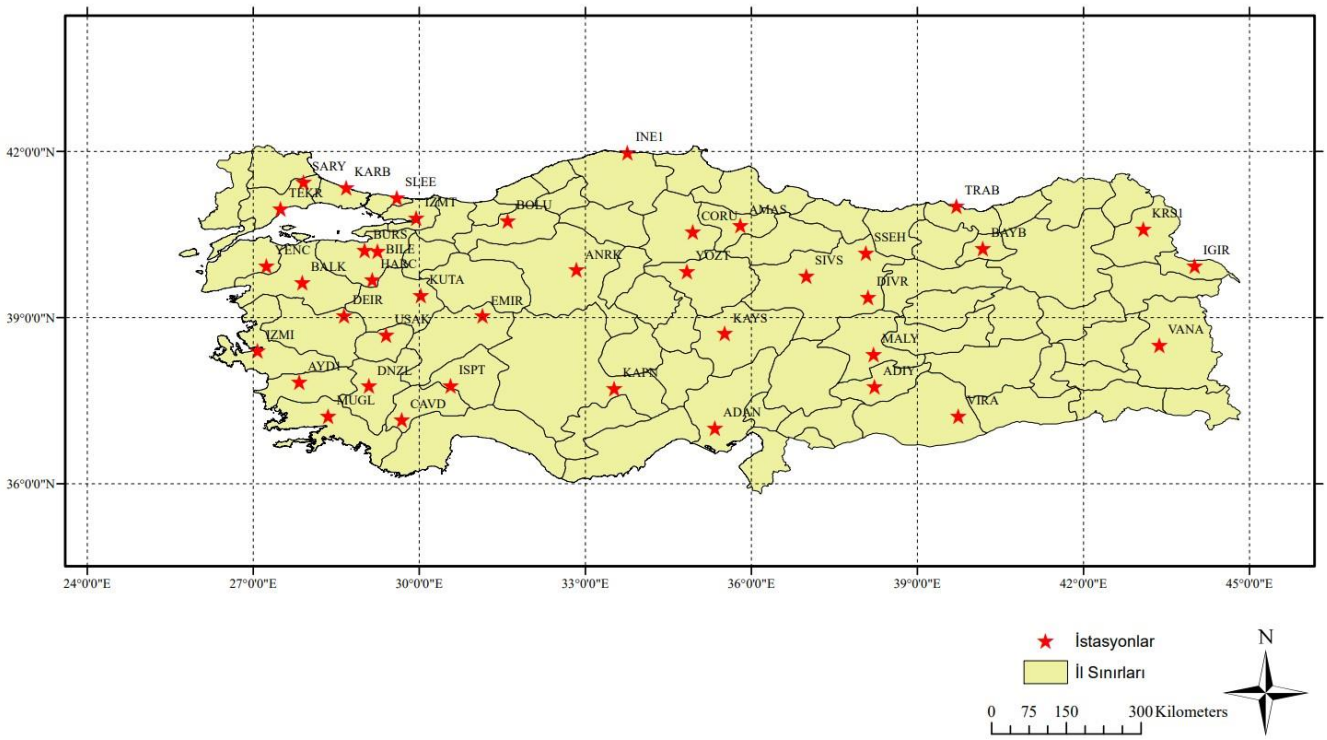
4

UYGULAMA

Bu bölümde, ülkemizde yer alan sürekli GNSS istasyonlara ilişkin bazı zaman serileri analiz edilmiş, gürültü modellerinin nokta hızları üzerine etkisi araştırılmıştır.

4.1 Çalışma Alanı ve Verilerin Tanıtılması

GEOTSATOOL ile analizler gerçekleştirmek için, konumları Şekil 4.1'de gösterilmiş 40 adet ulusal GNSS istasyonu günlük zaman serileri kullanılmıştır.



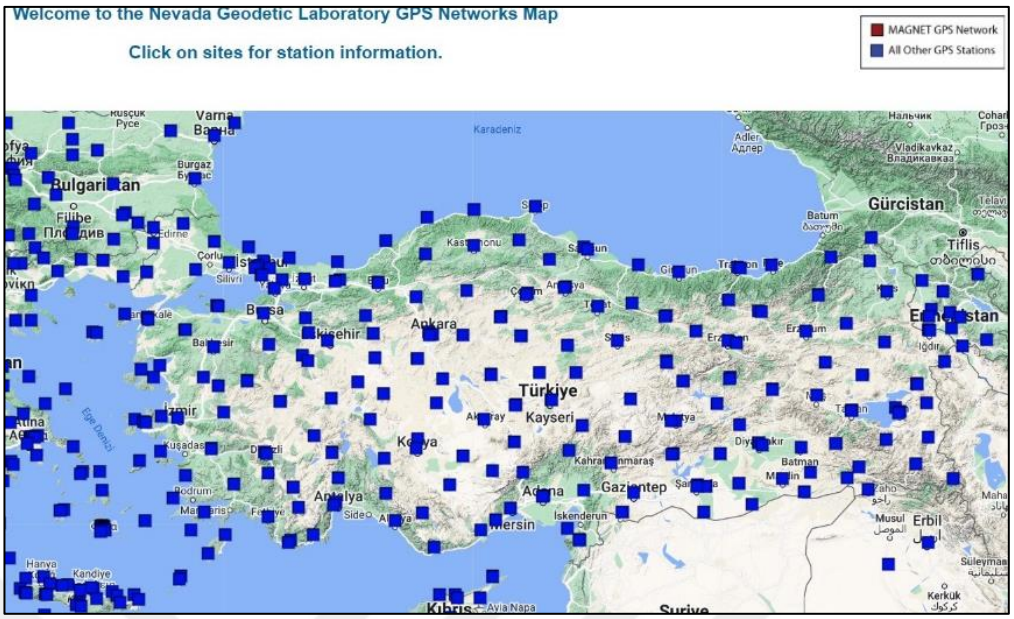
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan GNSS istasyonları konumları

Kullanılan GNSS zaman serileri verileri Nevada Jeodezik Laboratuvarı web sayfasından (URL-1) IGS14 datumunda (söz konusu datum ITRF-14 datumuna karşılık gelmektedir) temin edilmiştir. Verilerin seçilmesi aşamasında GNSS zaman serisi analizinin sağlıklı

bir şekilde yapılabilmesi gözetilerek, veri boşlukları az ve veri uzunluğu en az 3 yıl olan istasyonların kullanılmasına özen gösterilmiştir.

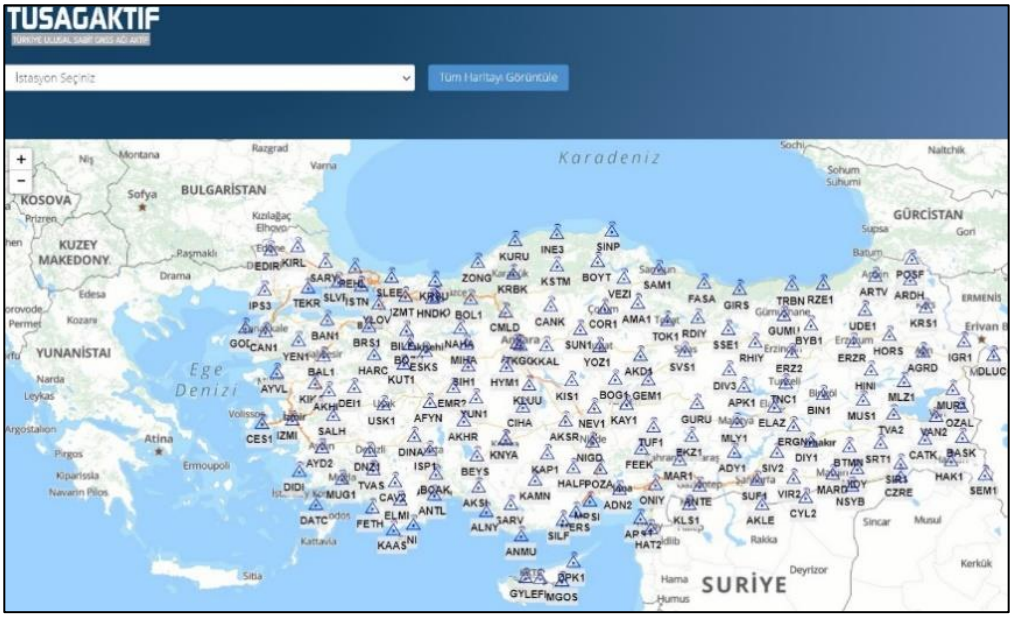
Tablo 4.1 Çalışmada kullanılan GNSS istasyonları konumları ve veri aralıkları

İSTASYON	φ	λ	Veri Aralığı	Gözlem Sayısı
ADAN	37,00349933	35,34371335	2009.0431-2015.8303	2310
ADIY	37,74585826	38,22967930	2009.0431-2015.8303	2308
AMAS	40,65693418	35,80953423	2009.0431-2015.8303	2225
ANRK	39,85596459	32,84620185	2009.0431-2015.8303	2248
AYD1	37,84072643	27,83788427	2009.0431-2015.8303	2278
BALK	39,62949799	27,89266048	2009.0431-2015.8303	2321
BAYB	40,25015029	40,19143542	2009.0431-2015.8303	2219
BILE	40,19143542	29,25015029	2009.0431-2015.8303	2245
BOLU	40,74641019	31,60648981	2009.0431-2015.8303	2302
BURS	40,21425132	29,01522911	2009.0431-2015.8303	2247
CAVD	37,15636927	29,69016345	2009.0431-2012.9254	1334
CORU	40,54124758	34,94924798	2009.0431-2015.8303	2270
DEIR	39,03485078	28,64840498	2009.0431-2015.4552	2026
DIVR	39,37004153	38,11690434	2009.5524-2015.8303	2049
DNZL	37,76210178	29,09213416	2009.0431-2015.8303	2277
EMIR	39,02218994	31,14402583	2009.0431-2015.7947	2275
HARC	39,67774366	29,15276028	2009.0431-2015.8303	2311
IGIR	39,92920075	44,01825144	2009.0431-2015.8303	2204
INE1	41,97900029	33,76286084	2012.9090-2015.8303	898
ISPT	37,77065718	30,56754805	2012.9090-2015.8303	2203
IZMI	38,39480763	27,08182203	2008.6078-2023.5291	4725
IZMT	40,80197816	29,95093363	2009.0431-2015.8303	2292
KAPN	37,71441643	33,52827869	2009.0431-2015.8303	2297
KARB	41,34711842	28,68277089	2009.0431-2015.8303	2170
KAYS	38,70837209	35,52446088	2009.0431-2015.8303	2271
KRS1	40,58845158	43,09344334	2008.7392-2023.5291	4885
KUTA	39,39415354	30,03364088	2009.0431-2015.8303	2255
MALY	38,33769464	38,21688943	2009.0431-2015.8303	2192
MUGL	37,21429319	28,35567619	2009.0431-2015.8303	2198
SARY	41,44296826	27,91643432	2009.0431-2015.8303	2314
SIVS	39,74369878	37,00249451	2009.0431-2015.8303	2320
SLEE	41,16872912	29,60068186	2009.0431-2015.6824	2244
SSEH	40,16247306	38,07489458	2009.0431-2015.8303	2338
TEKR	40,95833459	27,49649646	2009.0431-2015.8303	2313
TRAB	41,00540941	39,71148925	1999.9452-2007.9042	2614
USAK	38,67921328	29,40522090	2009.0431-2015.8303	2264
VANA	38,50005089	43,37935366	2012.9117-2015.7919	847
VIRA	37,22553034	39,74872792	2009.0431-2014.9131	1999
YENC	39,93593909	27,24170587	2009.0431-2015.8303	2263
YOZT	39,83144404	34,84472677	2009.0431-2015.4935	2020



Şekil 4.2 Nevada GNSS istasyonları haritası

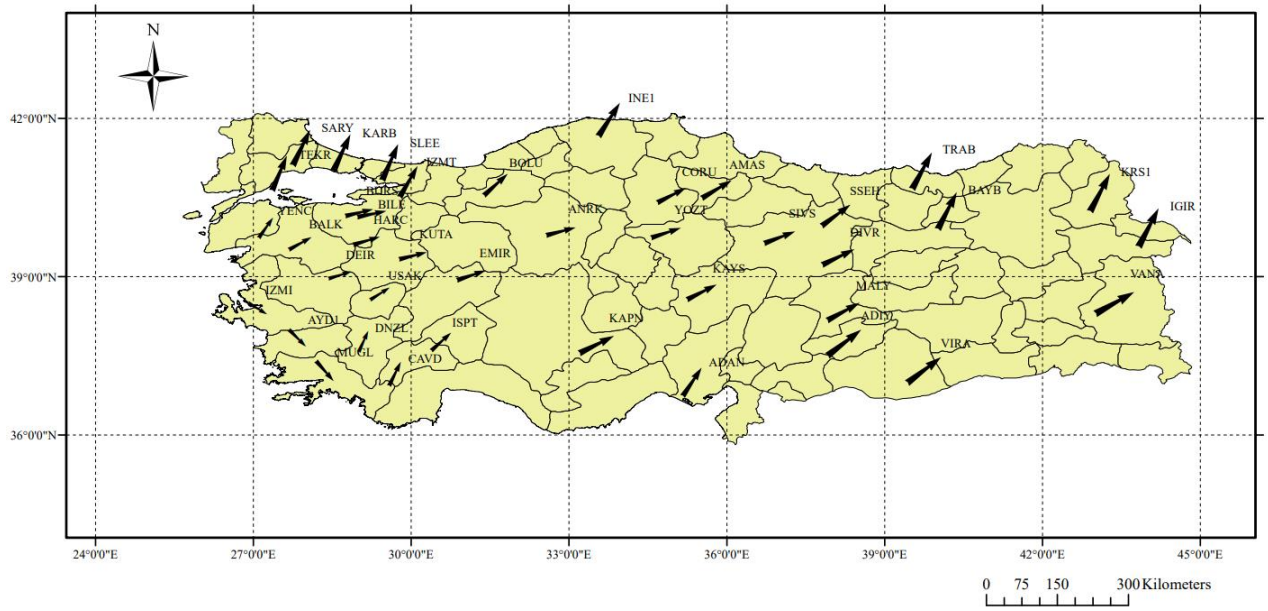
Öncelikle, nokta hızları GEOTSATOOL ile gürültü modeli göz önüne alınmadan ancak kaba hata analizi yapılarak elde edilmiştir. Yazılımla elde edilen hızlar hem Nevada (URL-1) hem de TUSAGAKTIF (URL-2) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.3 TUSAGA GNSS istasyonları haritası

Tablo 4.2'de ilgili GNSS istasyonlarının GEOTSATOOL, Nevada, TUSAGA'dan elde edilen Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri hız büyüklükleri yer almaktadır. Söz konusu hızlar incelendiğinde GEOTSATOOL ve Nevada Doğu ve Kuzey bileşen hızlarının

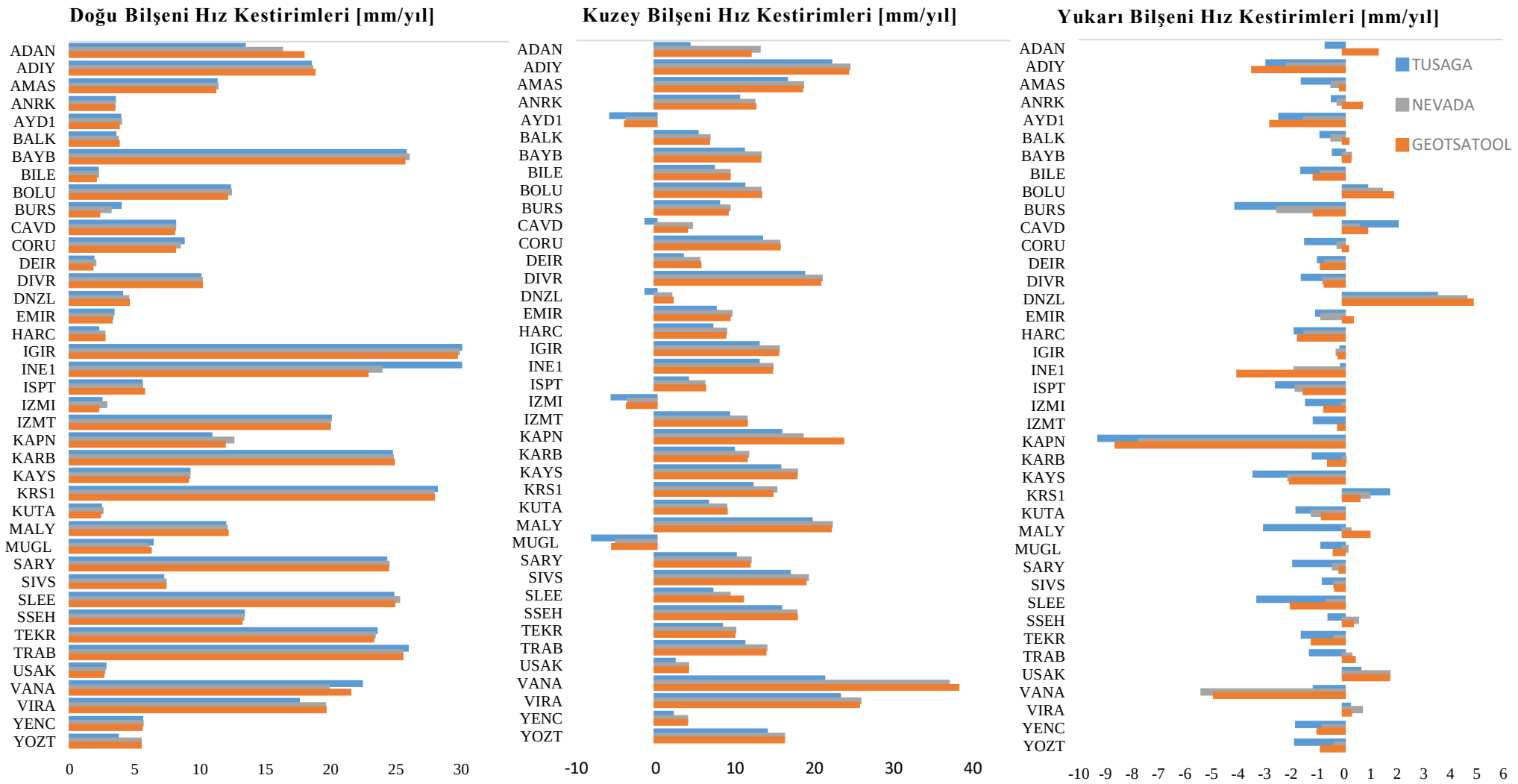
uyumlu olduğu, Yukarı bileşen hızlarının ise belli oranlarda farklılaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, Nevada hızları arka planda yapılan belli ağırlıklandırmaların sonuçlarıdır; Doğu ve Batı bileşenleri nispeten büyük olduğu için bu ağırlıklandırma farkları sonuçlara yansımazken, Yukarı bileşen Anadolu'da küçük olduğu için sonuçlarda göz önüne çıkmaktadır. TUSAGA ile oluşan farklar ise veri uzunluğu, değerlendirme stratejisi vb. farklardan oluşmaktadır. Kuzey-Doğu hız haritası Şekil 4.4'te, üç farklı şekilde elde edilen hızların dağılımı ise Şekil 4.5'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 GEOTSATOOL hız kestirimi sonucu Doğu- Kuzey bileşenleri hız vektörleri

Tablo 4.2 Hız kestirim sonuçlarının Nevada ve TUSAGA sonuçları ile karşılaştırılması

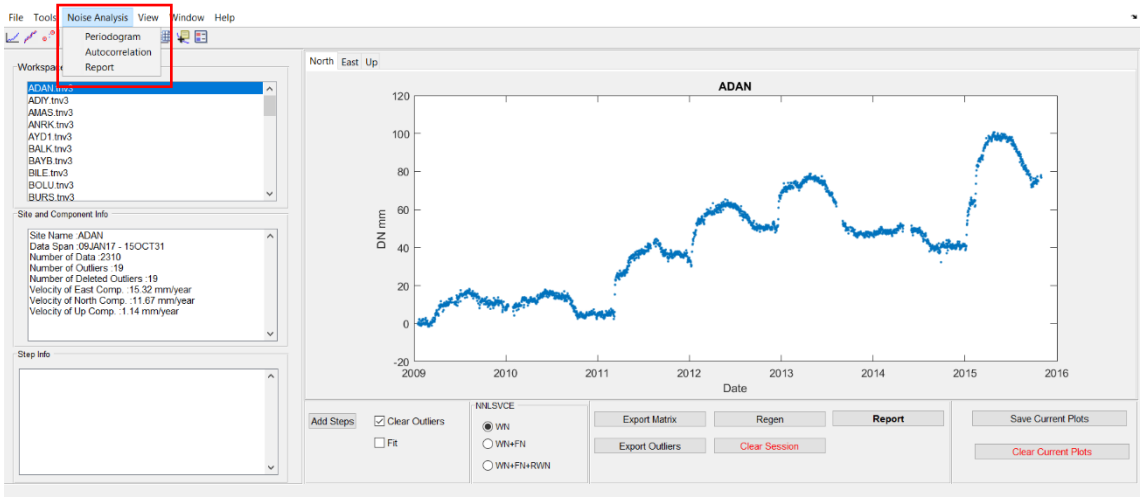
	DOGU (mm/yıl)			KUZEY (mm/yıl)			YUKARI (mm/yıl)		
İSTASYON	**TUSAGA**	**NEVADA**	**GEOTSATOOL**	**TUSAGA**	**NEVADA**	**GEOTSATOOL**	**TUSAGA**	**NEVADA**	**GEOTSATOOL**
ADAN	13,37	16,20	17,85	4,17	13,01	11,85	-0,66	0,00	1,24
ADIY	18,42	18,53	18,69	22,01	24,30	24,14	-2,88	-2,12	-3,43
AMAS	11,19	11,28	11,08	16,42	18,49	18,37	-1,56	-0,44	-0,12
ANRK	3,39	3,36	3,35	10,43	12,35	12,46	-0,42	-0,20	0,65
AYD1	3,81	3,87	3,70	-5,60	-3,57	-3,73	-2,39	-1,46	-2,74
BALK	3,44	3,61	3,69	5,15	6,69	6,64	-0,84	-0,43	0,14
BAYB	25,70	25,90	25,58	11,04	13,10	13,03	-0,38	0,23	0,21
BILE	2,10	2,14	1,93	7,23	9,22	9,22	-1,56	-0,83	-1,11
BOLU	12,20	12,29	12,01	11,08	13,10	13,19	0,84	1,40	1,81
BURS	3,85	3,06	2,21	7,88	9,23	8,95	-4,05	-2,47	-1,10
CAVD	8,03	8,02	7,93	-1,13	4,43	3,85	1,99	0,51	0,85
CORU	8,68	8,38	8,03	13,29	15,48	15,52	-1,42	-0,20	0,12
DEIR	1,74	1,89	1,69	3,33	5,42	5,51	-0,95	-0,67	-0,84
DIVR	9,96	10,08	10,06	18,60	20,83	20,62	-1,55	-0,75	-0,69
DNZL	3,95	4,43	4,46	-1,18	1,86	2,01	3,47	4,58	4,82
EMIR	3,29	3,21	3,14	7,46	9,42	9,22	-1,02	-0,81	0,30
HARC	2,12	2,58	2,61	7,00	8,79	8,68	-1,82	-1,45	-1,70
IGIR	29,93	29,75	29,59	12,86	15,39	15,33	-0,10	-0,24	-0,17
INE1	29,94	23,83	22,76	12,85	14,61	14,56	-0,08	-1,83	-3,99
ISPT	5,44	5,50	5,62	3,95	6,03	6,16	-2,52	-1,79	-1,48
IZMI	2,39	2,73	2,13	-5,42	-3,30	-3,49	-1,39	-0,04	-0,70
IZMT	19,96	19,86	19,85	9,12	11,35	11,37	-1,10	0,00	-0,19
KAPN	10,79	12,46	11,81	15,69	18,42	23,52	-9,22	-7,69	-8,57
KARB	24,61	24,68	24,77	9,76	11,57	11,40	-1,14	0,04	-0,57
KAYS	9,12	9,12	9,00	15,60	17,68	17,65	-3,37	-2,05	-2,01
KRS1	28,06	27,82	27,83	12,09	15,10	14,61	1,66	0,93	0,55
KUTA	2,33	2,47	2,28	6,51	8,79	8,83	-1,75	-1,17	-0,79
MALY	11,84	11,98	12,02	19,56	22,10	21,99	-2,97	0,22	0,93
MUGL	6,30	5,97	6,13	-7,93	-4,92	-5,37	-0,81	0,11	-0,34
SARY	24,19	24,36	24,34	10,00	11,86	11,76	-1,88	-0,38	-0,13
SIVS	7,11	7,28	7,27	16,81	19,07	18,81	-0,76	-0,32	-0,29
SLEE	24,72	25,17	24,82	7,03	9,19	10,89	-3,22	-0,62	-1,97
SSEH	13,28	13,25	13,09	15,72	17,61	17,69	-0,55	0,50	0,31
TEKR	23,46	23,32	23,18	8,26	9,90	9,78	-1,55	-0,32	-1,18
TRAB	25,81	25,43	25,43	11,09	13,82	13,70	-1,24	0,24	0,37
USAK	2,67	2,58	2,52	2,29	3,94	3,97	0,59	1,69	1,67
VANA	22,32	19,79	21,44	21,11	36,88	38,05	-1,11	-5,34	-4,87
VIRA	17,48	19,50	19,52	23,09	25,68	25,51	0,19	0,64	0,23
YENC	5,50	5,52	5,46	2,02	3,87	3,84	-1,78	-0,76	-0,96
YOZT	3,62	5,37	5,39	13,88	16,08	16,09	-1,80	-0,35	-0,84



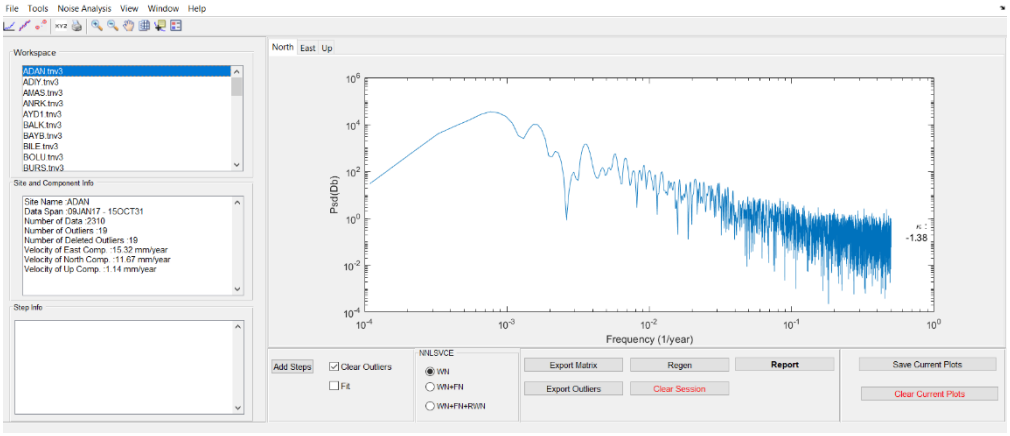
Şekil 4.5 Hız kestirimlerinin grafiksel dağılımı

4.2 GEOTSATOOL Gürültü Analizi

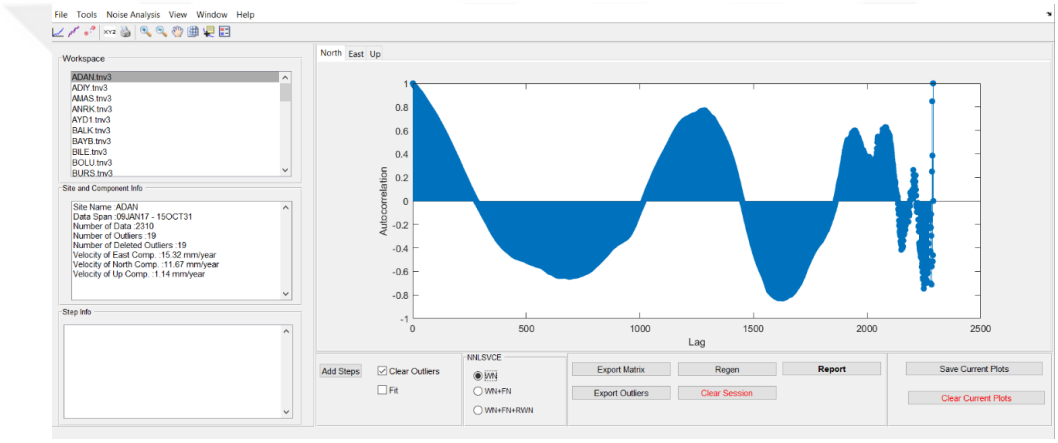
GNSS zaman serileri analizinde veri setindeki hataların zamandan bağımsız olduğu, yani beyaz gürültü içerdiği yaklaşımı geleneksel bir yaklaşımdır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, zaman serileri beyaz gürültünün yanı sıra zamana bağımlı hatalar, yani renkli gürültü de içermektedir. Kırpışma gürültüsü ve rastgele yürüyüş gürültüsü en yaygın bilinen iki renkli gürültü türüdür. Zaman serileri analizinde var olan bu renkli gürültü türlerinin göz ardı edilmesi, harmonik regresyonda geçen her bir parametrenin, özellikle hız parametre standart hatasının daha düşük değerlerde kestirimine yol açmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen GEOTSATOOL ile gürültü yapısı, düzeltmeler, bunların log-log PSD ve otokorelasyon grafikleri incelenerek, ağırlıklandırma WN, WN+FN ve WN+FN+RWN gürültü modellerine göre oluşturulmaktadır. Çalışma bölgesindeki istasyonların Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenlerine ilişkin zaman serileri tek tek incelenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan istasyonlardan ADAN istasyonu Kuzey bileşeni düzeltmeleri, PSD grafiği ve Otokorelasyon grafiği Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de örnek olarak gösterilmiştir. Seçilen modele göre, "raporlama" tuşuna basıldığında NNLSVCE yöntemine göre gürültü genlikleri kestirilmektedir. ADAN istasyonu, oldukça yüksek bir gürültü oranına sahiptir, bu nedenle yazılımda "WN+FN+RWN" modeline göre kestirim yapılmıştır. Elde edilen rapor sonucunda özet bilgiler Şekil 4.9'da gösterilmiştir; her üç bileşen için bu örnekte RWN'nin FN'ye göre baskın olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, yaklaşık 2.5 mm/yıl'lık hız standart hataları elde edilmiştir.



Şekil 4.6 ADAN noktasına ilişkin düzeltmeler grafiği



Şekil 4.7 ADAN noktası log-log PSD grafiği P



Şekil 4.8 ADAN noktası otokorelasyon grafiği

```
                                GEOTSATOOT REPORT FILE
CREATION DATE:20-Aug-2023
-------------------------------------------------------------------------------------------------------
STATION NAME              :      ADAN                  EAST VELOCITY :  1.79 +/- 2.59 mm/year
FUNCTIONAL MODEL          :       MLE                 NORTH VELOCITY :  5.39 +/- 2.50 mm/year
STOCHASTIC MODEL          :   NNLSCVE                    UP VELOCITY : -4.54 +/- 2.50 mm/year
NUMBER OF OBSERVATIONS    :      2310                  S.INDEX EAST :-1.55
DATA SPAN                 :      2310                 S.INDEX NORTH :-1.47
NUMBER OF OUTLIERS        :         0                    S.INDEX UP :-0.67
NUMBER OF UNKNOWN         :        18                  NNLSCVE EAST :WN+RWN
NUMBER OF STEPS           :         0                  NNLSCVE NOTH :WN+RWN
APPROXİMATE LAT           :  37.00350                    NNLSCVE UP :WN+RWN
APPROXİMATE LONG          :-324.65629                     EAST VCs :1.06/0.00/4.67
APPROXİMATE h             :     60.53                    NORTH VCs :0.97/0.00/4.53
                                                          UP VCs :3.99/0.00/4.06
-------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

Şekil 4.9 ADAN noktasına ilişkin kestirim sonrası rapor dosyası

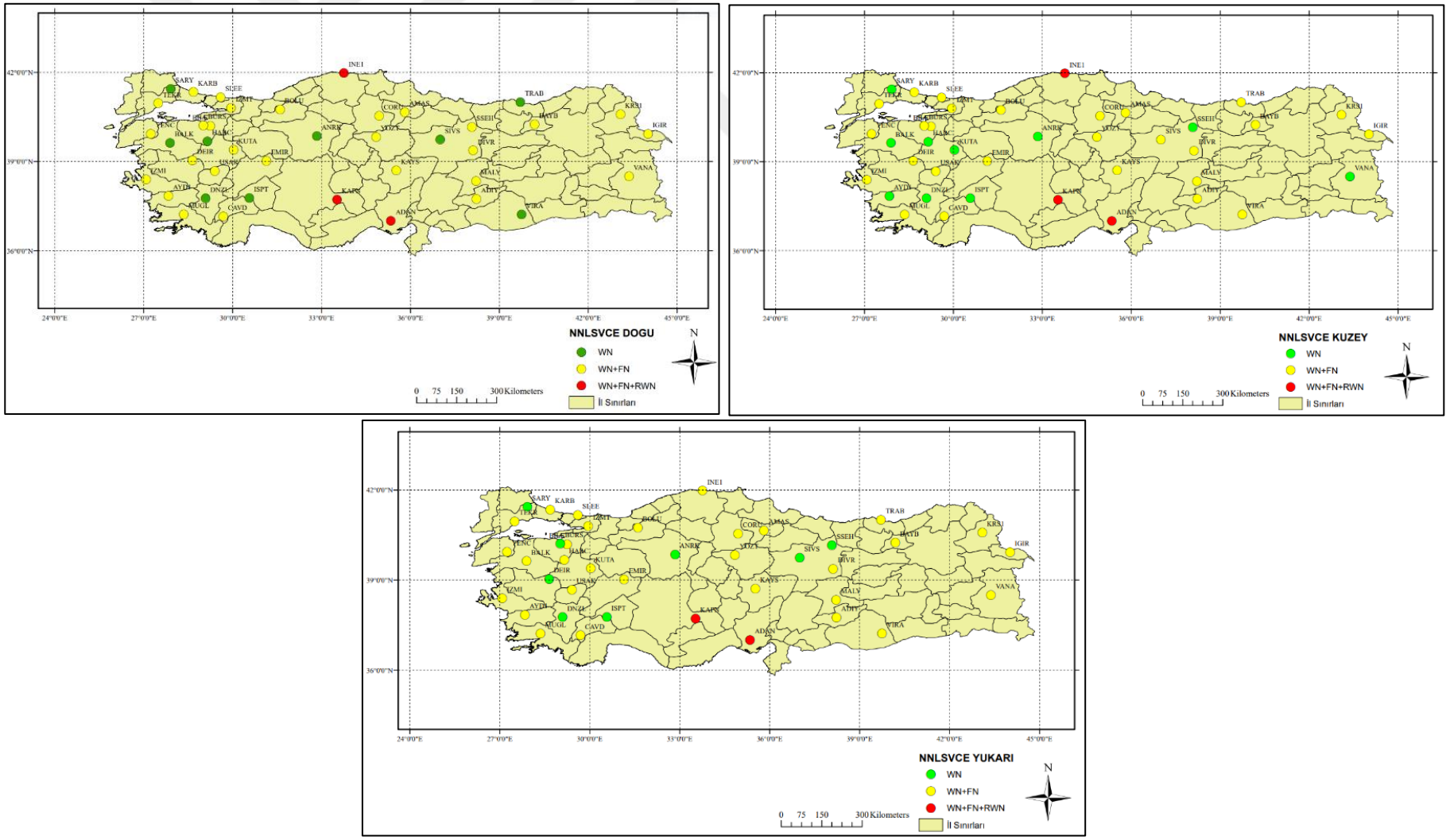
Yukarıda ADAN noktası için örneklendirilmiş analizler, çalışma bölgesindeki 40 adet GNSS istasyonu için tek tek uygulanmıştır. Bu istasyonların Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenlerine ait hız belirsizlikleri, spektral indeks değerleri ve kestirim sonucunda tespit

edilen gürültü modeli sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Gürültü modellerinin ve spektral indeks değerlerinin coğrafi dağılımı ise Şekil 4.11 ve 4.12'de gösterilmiştir.

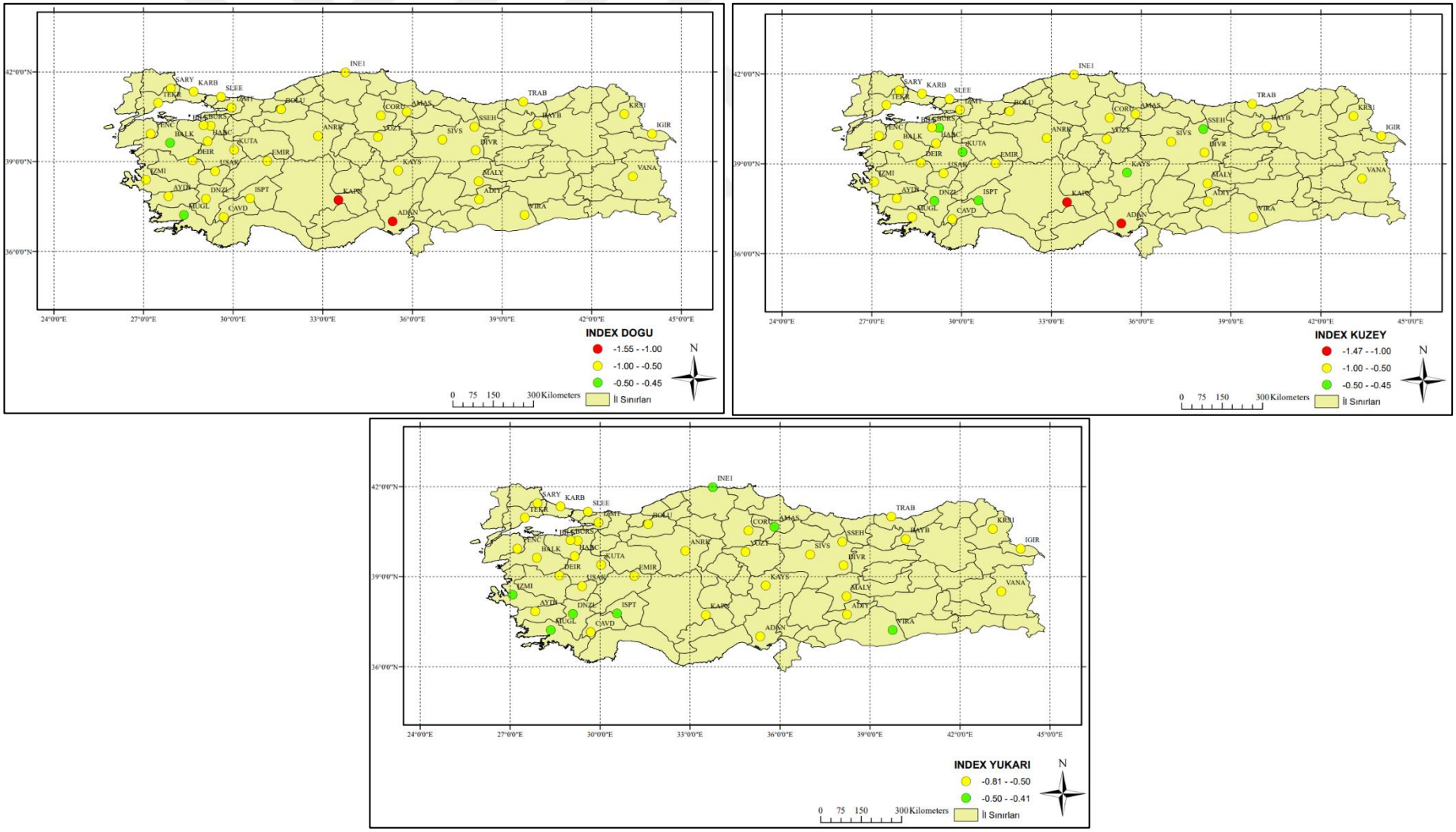
Elde edilen sonuçlara göre; Doğu bileşeni için yalnızca 3 istasyonda (ADAN, INE1, KAPN) RWN, 28 istasyonda FN tespit edilmiş, 9 adet istasyonda ise herhangi bir renkli gürültünün varlığına rastlanılmamıştır. Kuzey bileşeni için yine 3 istasyonda (ADAN, INE1, KAPN) RWN, 27 istasyonda FN tespit edilmiş, 10 adet istasyonda ise herhangi bir renkli gürültünün varlığı görülmemiştir. Yukarı bileşen için yalnızca 2 istasyonda (ADAN, KAPN) RWN, 29 istasyonda FN tespit edilmiş, 8 adet istasyonda ise herhangi bir renkli gürültüyle karşılaşılmamıştır. Buna göre, ülkemizdeki sabit GNSS istasyonlarının yaklaşık %73'ü FN, %8'i RWN ile yüklüyken, geri kalanları yalnızca WN'ye sahiptir. Spektral indeksler ise çoğunlukla -0,50 ile -1 arasında yer almaktadır.

Tablo 4.3 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri standart hataları, spektral indeks değerleri ve gürültü modelleri

İSTASYON	DOGU			KUZEY			YUKARI		
	Standart Hata (mm/yıl)	κ	Model	Standart Hata (mm/yıl)	κ	Model	Standart Hata (mm/yıl)	κ	Model
ADAN	2,59	-1,55	WN+RWN	2,50	-1,47	WN+RWN	2,50	-0,67	WN+RWN
ADIY	0,07	-0,54	WN+FN	0,07	-0,58	WN+FN	0,07	-0,53	WN+FN
AMAS	0,05	-0,60	WN+FN	0,05	-0,51	WN+FN	0,04	-0,44	WN+FN
ANRK	0,01	-0,58	WN	0,02	-0,61	WN	0,06	-0,68	WN
AYD1	0,07	-0,53	WN+FN	0,02	-0,54	WN	0,02	-0,50	WN+FN
BALK	0,04	-0,45	WN	0,04	-0,61	WN	0,04	-0,57	WN+FN
BAYB	0,12	-0,61	WN+FN	0,08	-0,52	WN+FN	0,08	-0,56	WN+FN
BILE	0,05	-0,52	WN+FN	0,06	-0,50	WN+FN	0,06	-0,57	WN+FN
BOLU	0,04	-0,60	WN+FN	0,05	-0,52	WN+FN	0,04	-0,63	WN+FN
BURS	0,10	-0,62	WN+FN	0,11	-0,63	WN+FN	0,15	-0,62	WN
CAVD	0,15	-0,51	WN+FN	0,14	-0,62	WN+FN	0,12	-0,54	WN+FN
CORU	0,06	-0,60	WN+FN	0,05	-0,65	WN+FN	0,05	-0,61	WN+FN
DEIR	0,08	-0,55	WN+FN	0,09	-0,51	WN+FN	0,14	-0,56	WN
DIVR	0,14	-0,57	WN+FN	0,11	-0,55	WN+FN	0,10	-0,51	WN+FN
DNZL	0,04	-0,50	WN	0,06	-0,48	WN	0,13	-0,45	WN
EMIR	0,04	-0,57	WN+FN	0,04	-0,73	WN+FN	0,05	-0,59	WN+FN
HARC	0,05	-0,65	WN	0,04	-0,65	WN	0,03	-0,62	WN+FN
IGIR	0,09	-0,70	WN+FN	0,10	-0,73	WN+FN	0,09	-0,56	WN+FN
INE1	0,38	-0,61	WN+RWN	0,53	-0,94	WN+RWN	0,34	-0,49	WN+FN
ISPT	0,02	-0,68	WN	0,02	-0,48	WN	0,05	-0,47	WN
IZMI	0,05	-0,55	WN+FN	0,05	-0,50	WN+FN	0,06	-0,48	WN+FN
IZMT	0,07	-0,66	WN+FN	0,07	-0,70	WN+FN	0,06	-0,65	WN+FN
KAPN	2,53	-1,47	WN+RWN	1,75	-1,17	WN+RWN	1,75	-0,81	WN+RWN
KARB	0,05	-0,63	WN+FN	0,06	-0,74	WN+FN	0,06	-0,64	WN+FN
KAYS	0,04	-0,56	WN+FN	0,04	-0,48	WN+FN	0,04	-0,57	WN+FN
KRS1	0,05	-0,63	WN+FN	0,05	-0,61	WN+FN	0,05	-0,69	WN+FN
KUTA	0,07	-0,56	WN+FN	0,05	-0,48	WN	0,06	-0,57	WN+FN
MALY	0,10	-0,66	WN+FN	0,08	-0,54	WN+FN	0,08	-0,69	WN+FN
MUGL	0,10	-0,49	WN+FN	0,11	-0,63	WN+FN	0,11	-0,41	WN+FN
SARY	0,02	-0,55	WN	0,02	-0,63	WN	0,07	-0,70	WN
SIVS	0,03	-0,61	WN	0,07	-0,51	WN+FN	0,09	-0,64	WN
SLEE	0,07	-0,72	WN+FN	0,12	-0,91	WN+FN	0,11	-0,72	WN+FN
SSEH	0,07	-0,52	WN+FN	0,03	-0,45	WN	0,10	-0,55	WN
TEKR	0,07	-0,59	WN+FN	0,06	-0,58	WN+FN	0,07	-0,66	WN+FN
TRAB	0,13	-0,66	WN	0,13	-0,55	WN+FN	0,13	-0,66	WN+FN
USAK	0,08	-0,66	WN+FN	0,10	-0,64	WN+FN	0,08	-0,62	WN+FN
VANA	0,36	-0,81	WN+FN	0,14	-0,98	WN	0,13	-0,60	WN+FN
VIRA	0,04	-0,56	WN	0,08	-0,51	WN+FN	0,08	-0,49	WN+FN
YENC	0,04	-0,56	WN+FN	0,06	-0,59	WN+FN	0,07	-0,58	WN+FN
YOZT	0,05	-0,73	WN+FN	0,05	-0,64	WN+FN	0,05	-0,65	WN+FN



Şekil 4.10 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri gürültü modeli dağılımı



Şekil 4.11 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri spektral indeks değerleri dağılımı

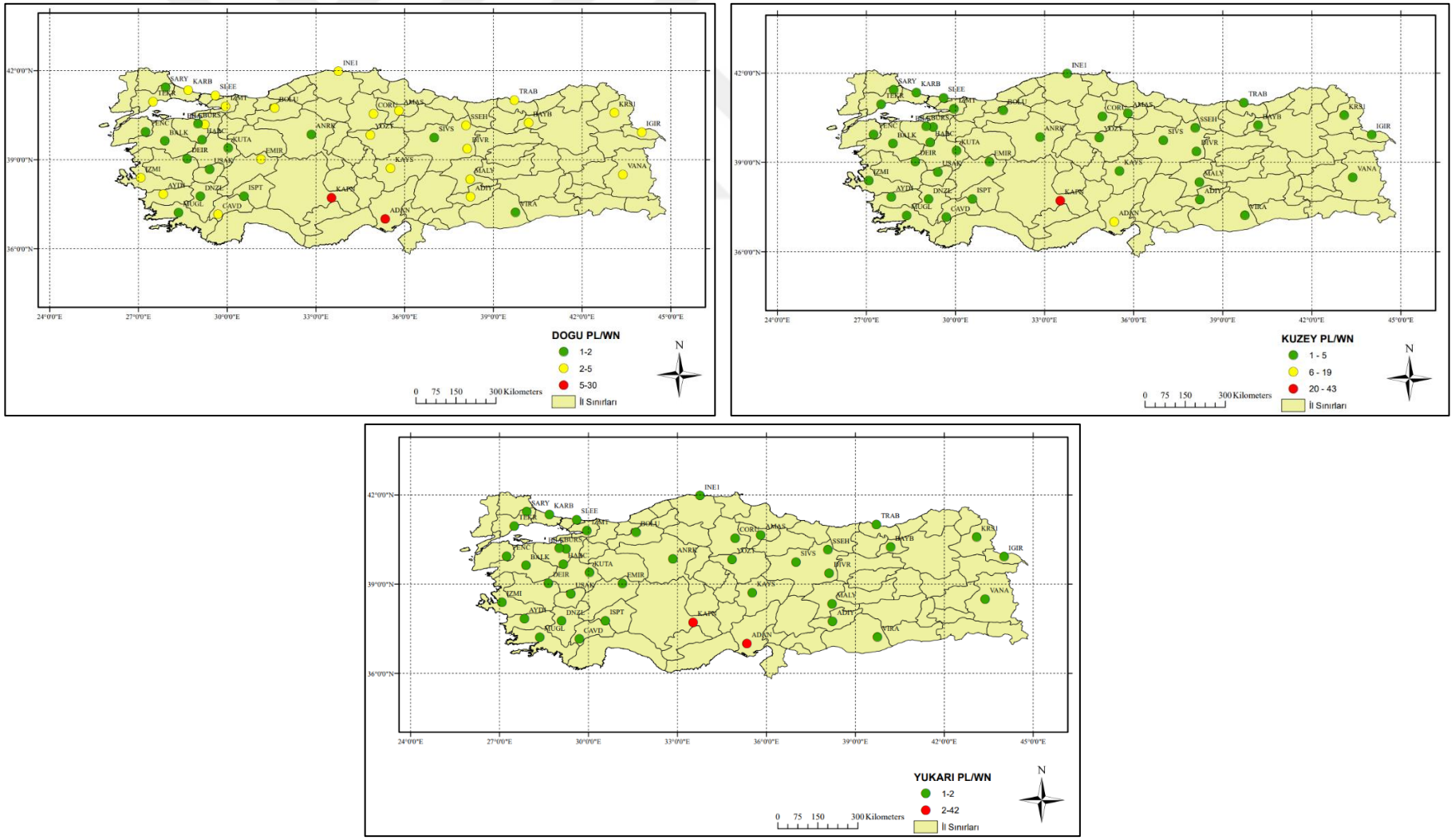
4.3 Renkli Gürültünün Hız Belirsizliğine Etkisi

GNSS zaman serileri analizinde ölçülerin yalnız WN içerdiği geleneksel yaklaşım, hız belirsizliklerinin olduğundan daha küçük kestirilmelerine yol açmaktadır. Bu da kestirilen hızların istatistik anlamlılığını önemli ölçüde değiştirir: Aslında anlamlı olmayan hızlar için "sinyal/noise" oranı yüksek olacağından, hızlar sürekli olarak anlamlı olmaya başlar.

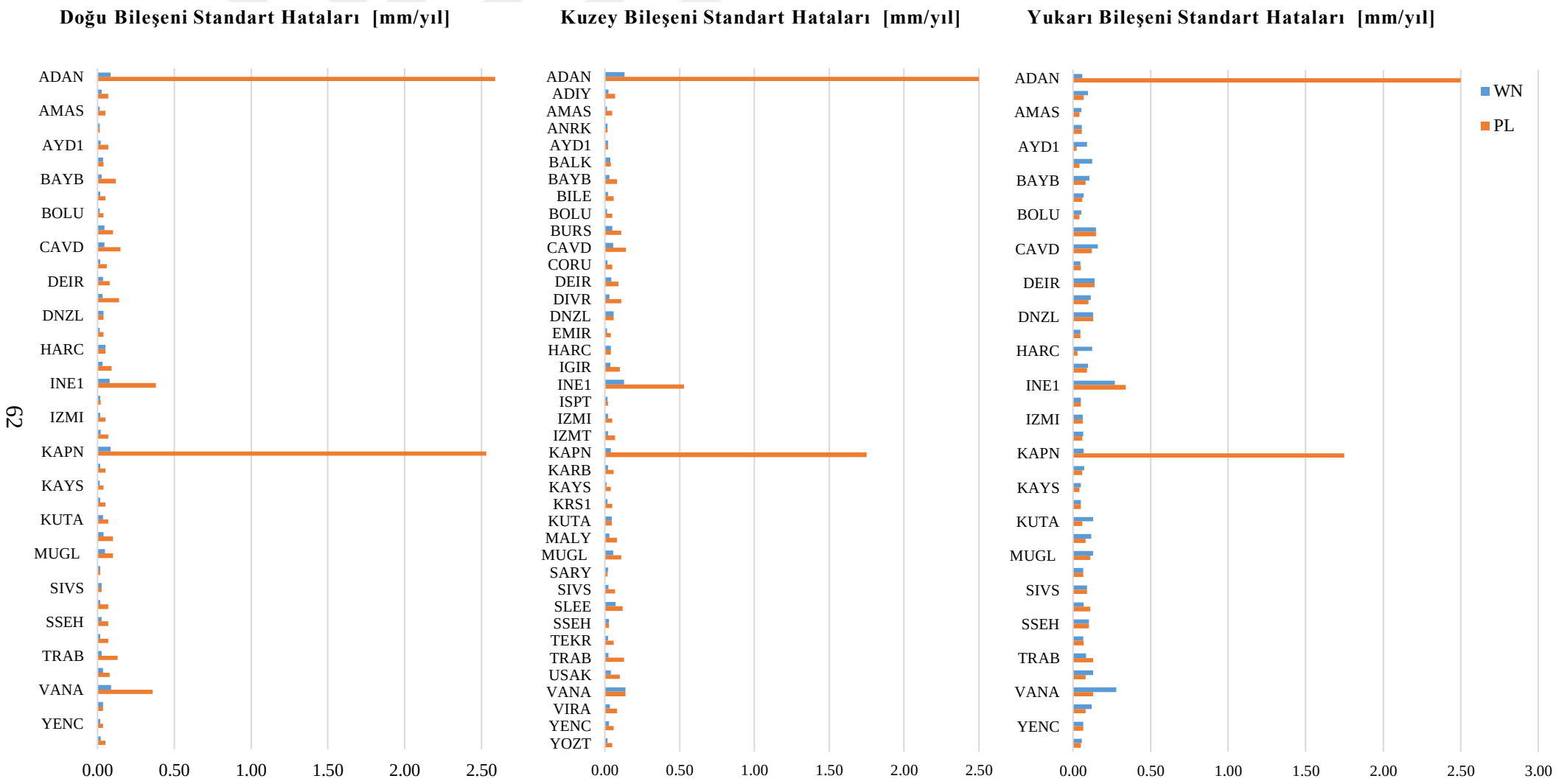
Gürültü türlerinin hız belirsizliği üzerine etkisini incelemek amacı ile GNSS zaman serilerinin hız standart hataları, gürültü modeli WN ve uygun gürültü modeli (PL) için karşılaştırılmıştır. Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri için elde edilen bu WN ve PL gürültü modellerine ilişkin hız belirsizlikleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Elde edilen WN ve PL hız standart hataları oranları incelendiğinde (bkz. Şekil 4.13 ve 4.14), birçoğunun 1'den yüksek olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle, WN modeli diğerine göre daha düşük hız standart hatalarına neden olmaktadır. Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenlerinin PL ve WN standart hataları oranının (PL/WN) en çok 30,8, 42,6, 42,8 (ADAN noktası) ve ortalama 4,5, 4,3 ve 2,7 olduğu görülmektedir. Buna göre, hızların standart hataları Doğu-Kuzey bileşenler için 4,4 kat, Yukarı bileşen için ise 2,7 kat bilinenden daha yüksektir. Daha genel bir ortalama vermek istediğimizde ise, gürültü modelinin uygun biçimde seçilmemesinin nokta hız standart hatalarını yaklaşık 4 kat daha düşük gösterdiği sonucunu görmekteyiz. Renkli gürültü uzun zaman serilerinde nokta hız kestirimlerini anlamlı biçimde değiştirmez. Bu nedenle, GNSS istasyonlarında uygun bir gürültü modelinin göz önüne alınmamasının "sinyal/noise" oranını olması gerekenden yaklaşık 4 kat daha yüksek gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 4.4 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri WN ve PL standart hataları karşılaştırması

İSTASYON	DOGU			KUZEY			YUKARI		
	WN Standart Hatası (mm/yıl)	PL Standart Hatası (mm/yıl)	Model	WN Standart Hatası (mm/yıl)	PL Standart Hatası (mm/yıl)	Model	WN Standart Hatası (mm/yıl)	PL Standart Hatası (mm/yıl)	Model
ADAN	0,08	2,59	WN+RWN	0,13	2,50	WN+RWN	0,06	2,50	WN+RWN
ADIY	0,03	0,07	WN+FN	0,02	0,07	WN+FN	0,10	0,07	WN+FN
AMAS	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,05	WN+FN	0,05	0,04	WN+FN
ANRK	0,01	0,01	WN	0,02	0,02	WN	0,06	0,06	WN
AYD1	0,02	0,07	WN+FN	0,02	0,02	WN	0,09	0,02	WN+FN
BALK	0,04	0,04	WN	0,04	0,04	WN	0,12	0,04	WN+FN
BAYB	0,03	0,12	WN+FN	0,03	0,08	WN+FN	0,10	0,08	WN+FN
BILE	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,06	WN+FN	0,07	0,06	WN+FN
BOLU	0,01	0,04	WN+FN	0,01	0,05	WN+FN	0,05	0,04	WN+FN
BURS	0,05	0,10	WN+FN	0,05	0,11	WN+FN	0,15	0,15	WN
CAVD	0,05	0,15	WN+FN	0,05	0,14	WN+FN	0,16	0,12	WN+FN
CORU	0,02	0,06	WN+FN	0,02	0,05	WN+FN	0,05	0,05	WN+FN
DEIR	0,04	0,08	WN+FN	0,04	0,09	WN+FN	0,14	0,14	WN
DIVR	0,03	0,14	WN+FN	0,03	0,11	WN+FN	0,12	0,10	WN+FN
DNZL	0,04	0,04	WN	0,06	0,06	WN	0,13	0,13	WN
EMIR	0,01	0,04	WN+FN	0,02	0,04	WN+FN	0,05	0,05	WN+FN
HARC	0,05	0,05	WN	0,04	0,04	WN	0,12	0,03	WN+FN
IGIR	0,03	0,09	WN+FN	0,04	0,10	WN+FN	0,10	0,09	WN+FN
INE1	0,08	0,38	WN+RWN	0,13	0,53	WN+RWN	0,27	0,34	WN+FN
ISPT	0,02	0,02	WN	0,02	0,02	WN	0,05	0,05	WN
IZMI	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,05	WN+FN	0,06	0,06	WN+FN
IZMT	0,02	0,07	WN+FN	0,02	0,07	WN+FN	0,07	0,06	WN+FN
KAPN	0,09	2,53	WN+RWN	0,04	1,75	WN+RWN	0,07	1,75	WN+RWN
KARB	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,06	WN+FN	0,07	0,06	WN+FN
KAYS	0,01	0,04	WN+FN	0,01	0,04	WN+FN	0,05	0,04	WN+FN
KRS1	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,05	WN+FN	0,05	0,05	WN+FN
KUTA	0,04	0,07	WN+FN	0,05	0,05	WN	0,13	0,06	WN+FN
MALY	0,04	0,10	WN+FN	0,03	0,08	WN+FN	0,12	0,08	WN+FN
MUGL	0,05	0,10	WN+FN	0,06	0,11	WN+FN	0,13	0,11	WN+FN
SARY	0,02	0,02	WN	0,02	0,02	WN	0,07	0,07	WN
SIVS	0,03	0,03	WN	0,03	0,07	WN+FN	0,09	0,09	WN
SLEE	0,02	0,07	WN+FN	0,07	0,12	WN+FN	0,07	0,11	WN+FN
SSEH	0,03	0,07	WN+FN	0,03	0,03	WN	0,10	0,10	WN
TEKR	0,02	0,07	WN+FN	0,02	0,06	WN+FN	0,06	0,07	WN+FN
TRAB	0,03	0,13	WN	0,02	0,13	WN+FN	0,08	0,13	WN+FN
USAK	0,04	0,08	WN+FN	0,04	0,10	WN+FN	0,13	0,08	WN+FN
VANA	0,09	0,36	WN+FN	0,14	0,14	WN	0,28	0,13	WN+FN
VIRA	0,04	0,04	WN	0,03	0,08	WN+FN	0,12	0,08	WN+FN
YENC	0,02	0,04	WN+FN	0,03	0,06	WN+FN	0,07	0,07	WN+FN
YOZT	0,02	0,05	WN+FN	0,02	0,05	WN+FN	0,06	0,05	WN+FN



Şekil 4.12 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri hızları için PL standart hatalarının WN standart hatalarına oranı (PL/WN)



Şekil 4.13 Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenleri için WN ve PL standart hataları dağılımı

5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

GNSS zaman serilerinin analizi, yerkabuğu ve mühendislik yapı deformasyonlarının izlenmesi için oldukça önemlidir. Bu zaman serilerinin analizinde genelde yalnızca beyaz gürültünün (WN'nin) olduğu düşünülmektedir. Ancak, beyaz gürültünün yanında zamana bağlı korelasyonlu olacak şekilde sürece etkiyen farklı gürültü türleri de bulunmaktadır. WN yanında, kırpışma gürültüsü (FN) ve rasgele yürüyüş gürültüsü (RWN) adı verilen renkli gürültü türlerinin çeşitli kombinasyonlarla GNSS zaman serilerinde yer aldığı uzunca bir süredir bilinen bir gerçektir. Bu gürültüye renkli gürültü denir ve GNSS zaman serilerinin analizinde bu gürültü türlerini içeren uygun gürültü modeli dikkate alınmalıdır. Uygun gürültü modelinin göz önüne alınmaması, zaman serileri için kullanılan harmonik regresyon parametrelerinin standart hatalarının düşük olmasına yol açar. Doğru bir kestirim için uygun gürültü modeli dikkate alınmalı ve ağırlıklandırma işlemi bu modele göre yapılmalıdır.

GNSS zaman serilerinin analizi için bu çalışmada MATLAB ortamında çalışan bir grafik kullanıcı arayüzüne sahip GEOTSATOOL adı verilen bir yazılım geliştirilmiştir. Söz konusu yazılımda, uygun formatta girilen koordinat değişimleri için yüksek mertebeden harmoniklerle regresyon modeli uygulanmakta, deprem ve anten değişimi gibi ofsetler modellenmekte, MAD yöntemine göre kaba hata araştırması yapılmakta, en küçük kareler yöntemiyle elde edilen düzeltmeler frekans alanında incelenerek, istenen gürültü modeline (WN, WN+FN ve WN+FN+RWN) göre kestirim işlemi NNLSCVE yöntemine göre gerçekleştirilmektedir. Elde edilen kestirim sonuçları, özet olarak raporlanmaktadır. Bu raporda seçilen modele göre elde edilen gürültü genlikleri ve kestirilen gürültü modeline ilişkin ağırlıklandırmaya göre hesaplanan hız ve standart hataları, Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenler için sunulmaktadır. Bu özet rapor dışında diğer parametrelerin kestirim değerleri ve standart hataları da elde edilebilmektedir.

Geliştirilen yazılım, Nevada Jeodezik Laboratuvarından elde edilen 40 adet GNSS istasyonu günlük zaman verilerinin analizi için kullanılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre, Doğu-Kuzey ve Yükseklik bileşenlerinin PSD grafiklerinden -0.5 ve -1.5 arasında değişen spektral indekse sahip oldukları gözlenmiştir. Buna göre, WN+FN ve

WN+FN+RWN gürültü modellerine göre kestirim işlemleri yapılmıştır. Elde edilen gürültü modellerine göre istasyonların %73'ünün FN ile yüklü olduğu, %8'inin RWN içerdiği görülmüştür. Bu modellere göre yapılan regresyon işlemi sonucunda hız standart hatalarının geleneksel birim ağırlıklı çözüme göre yatayda yaklaşık 4,4 kat, düşeyde ise yaklaşık 2,7 kat yüksek olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle, geleneksel birim ağırlıklı çözüm, hız standart hatalarının yaklaşık 4 kat daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. "Sinyal/Noise" oranı aslında olması gerekenden 4 kat daha yüksektir. Bu ise, aslında anlamsız olan bazı hızların geleneksel yöntemle anlamlıymış gibi yorumlanmasına neden olmaktadır.

Geliştirilen yazılım, kullanıcı dostu olmasının yanında daha da geliştirilmeye imkân sağlayacak açık kaynak kodlu bir yapıya sahiptir. Örneğin, yazılımda şu an yalnızca standart periyodik bileşenler göz önüne alınmaktadır. İleride kullanıcının tercih edeceği farklı periyodik sinyallerin manuel olarak tanımlanıp analize dahil edilmesi sağlanacaktır. Bununla birlikte, gürültü modeli halihazırda "WN", "WN+FN" ve "WN+FN+RWN" olarak seçilmektedir. İleriki versiyonlarda istenen spektral indekse sahip farklı renkli gürültü türlerinin de modele eklenmesi sağlanarak GNSS zaman serilerinin daha ayrıntılı ve özelde analizinin yapılabilmesi gerçekleştirilecektir.

KAYNAKÇA

[1] Mandelbrot, Benoit B. "The fractal geometry of Nature WH Freeman and Company." New York 8 (1983): 406-406.

[2] Agnew, Duncan Carr. "The time-domain behavior of power-law noises." Geophysical research letters 19.4 (1992): 333-336.

[3] Williams, S. D. P. "The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series." Journal of Geodesy 76 (2003): 483-494.

[4] Mandelbrot, Benoit B., and John W. Van Ness. "Fractional Brownian motions, fractional noises and applications." SIAM review 10.4 (1968): 422-437.

[5] Mao, Ailin, Christopher GA Harrison, and Timothy H. Dixon. "Noise in GPS coordinate time series." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 104.B2 (1999): 2797-2816.

[6] S. Dalğın, Uzun Dönem GPS Zaman Serilerinin Analizi ile Kampanya Tipi GPS Ölçmelerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

[7] T. Karan, Sabit GPS İstasyonlarında Zaman Serileri Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009

[8] Montillet, Jean-Philippe, and Machiel S. Bos, eds. Geodetic time series analysis in earth sciences. Springer, 2019.

[9] Aydin, C. et al. "Effect of Stochastic Model Errors on Significance Test for Velocities in Analysis of GPS Position Time Series." Journal of Surveying Engineering 147.1 (2021): 04020025.

[10] H. Duman, Episodik GPS Zaman Serileri İçin Uygun Stokastik Modelin Belirlenmesi, Doktora Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2022.

[11] Amiri-Simkooei, A. R. 2016. “Non-negative least-squares variance component estimation with application to GPS time series.” J. Geod. 90 (5): 451–466. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0886-9.

[12] Bogusz, J., and A. Klos. 2016. “On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series.” GPS Solution 20 (4): 655–664. https://doi.org/10.1007/s10291-015-0478-9.

[13] Ö. Güneş Zamana Bağlı Uydu Gravite Çözümlerinden Elde Edilen Kütle Değişimi Sinyallerinin Analizi. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[14] Zhang, Jie, et al. "Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities." Journal of geophysical research: solid earth 102.B8 (1997): 18035-18055.

[15] Langbein, John, and Hadley Johnson. "Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 102.B1 (1997): 591-603.

[16] Langbein, J. 2004. “Noise in two-color electronic distance meter measure ments revisited.” J. Geophys. Res. 109 (Apr): 4. https://doi.org/10.1029 /2003JB002819.

[17] Langbein, John. "Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 113.B5 (2008).

[18] Amiri-Simkooei, A. R. 2007. “Least-squares variance component estimation: Theory and GPS applications.” Ph.D. thesis, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, Delft Univ. of Technology

[19] Bos, M.S., Fernandes, R.M.S., Williams, S.D.P., and Bastos, L. (2013). Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. J. Geod., Vol 87(4), 351-360, doi:10.1007/s00190-012-0605-0.

[20] Williams SDP, (2008), "CATS : GPS coordinate time series analysis software" GPS Solutions, 12(2) 147-153.

[21] Teunissen, P. J. G., and A. R. Amiri-Simkooei. 2008.“Least-squares vari-ance component estimation.”J. Geod.82 (2): 65–82.https://doi.org/10.1007/s00190-007-0157-x

[22] Amiri-Simkooei, A. R. 2016.“Non-negative least-squares variance compo-nent estimation with application to GPS time series.”J. Geod.90 (5):451–466.https://doi.org/10.1007/s00190-016-0886-9.

[23] Nistor, Sorin, et al. "Analysis of noise and velocity in GNSS EPN-repro 2 time series." Remote Sensing 13.14 (2021): 2783.

[24] Langbein, John, and Jerry L. Svarc. "Evaluation of temporally correlated noise in Global Navigation Satellite System time series: Geodetic monument performance." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 124.1 (2019): 925-942.

[URL-1]: http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html (Erişim Tarihi: 06.10.2023)

[URL-2]: https://www.tusaga-aktif.gov.tr/Sayfalar/IstasyonKonumBilgileri.aspx (Erişim Tarihi: 09.10.2023)

.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. O. Serdar, C. Aydın " GPS Zaman Serilerinin Analizi İçin Bir Yazılım Tasarımı: GEOTSATOOL." Aktif Tektonik Araştırma Grubu (ATAG) Çalıştayı 2022, İstanbul, Türkiye, p.58, 2022.